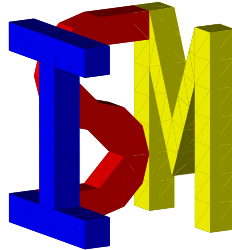


Bauhaus-Universität Weimar  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Institut für Strukturmechanik (ISM)




**Masterarbeit**

Nr. BM / 2014 / 19

im Studiengang Bauingenieurwesen

<b>Thema:</b>	Systemidentifikation von Bauteilen mittels optischer Messmethoden
<b>eingereicht von:</b>	Lüdtke, Cornelius geb. 15.07.1988 in Starnberg
<b>Ausgabetermin:</b>	08. Dezember 2014
<b>Abgabetermin:</b>	08. April 2015
<b>Erstprüfer:</b>	Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke
<b>Zweitprüfer:</b>	Dipl. Phys. Albrecht Schmidt
<b>Zweitprüfer:</b>	MSc. Michael Theiler

Weimar, 05. Dezember 2014

  
Prof. Dr.-Ing. Timon Rabczuk  
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

## Ausgangssituation und Zielstellung

Die Akustik von Automobilen spielt heutzutage eine entscheidende Rolle bei der Fahrzeugentwicklung. Aufgrund steigender Ansprüche an Komfort und durch gesetzliche Regelungen sind die Hersteller ständig bemüht, die Geräuschemissionen ihrer Fahrzeuge zu optimieren. Eine Optimierung in diesem Sinne umfasst dabei aber nicht nur die Geräuschreduktion. Der neueste Trend in der Entwicklung hin zu hybriden oder elektrischen Fahrzeugen zeigt, dass Fahrzeuge auch zu leise werden können. Deshalb gewinnt die Berechnung von mechanischen und akustischen Eigenschaften basierend auf FEM<sup>1</sup>-Simulationen zunehmend an Bedeutung, bevor erste Prototypen mit hohem Aufwand experimentell untersucht werden.

Mit Hilfe von modernen CAE<sup>2</sup>-basierten Simulationsprozessen ist es möglich, numerische Voruntersuchungen durchzuführen, um u.a. das akustische Design zu verbessern. Der derzeitige Stand der Methoden ermöglicht zwar qualitative Vergleiche von verschiedenen Ausführungsvarianten, jedoch stellt eine präzise und verlässliche quantitative Vorhersage immer noch eine Herausforderung dar. Ein Aspekt im Rahmen der Verbesserung der Vorhersagequalität - insbesondere am Motor-/Getriebeverbund von Automobilen - ist die genauere Modellierung von Dämpfungseffekten. Hierzu zählen die Materialdämpfung, die Fügestellendämpfung, die Auflagerdämpfung sowie die Abstrahldämpfung durch die umgebende Luft.

Zur Bestimmung der Dämpfungskenngrößen werden am Institut für Strukturmechanik experimentelle Untersuchungen an realen Bauteilen und an aus Bauteilen herausgeschnittenen Probekörpern durchgeführt, um das Verhalten anschließend in numerischen Simulationen vorherzusagen zu können. Zur Messung der Materialdämpfung wurde hierzu ein Versuchsaufbau entwickelt, mit dem die Dämpfung mit Hilfe eines Ausschwingversuches mittels des logarithmischen Dekrements bestimmt werden kann. Sowohl die Anregung des Bauteils erfolgt hierbei berührungslos (akustische Anregung mit Lautsprecher) als auch die Messung (optische Messung mit Laser-Vibrometer). Die Lagerung der Probekörper erfolgt elastisch durch Fäden in Knotenpunkten der Eigenformen des Bauteiles. Dadurch sollen Fremddämpfungseinflüsse, die die Messungen verfälschen, auf ein Minimum reduziert werden.

Im Rahmen dieser Masterarbeit ist der bisherige Versuchsaufbau zu modifizieren, um eine flächige Abtastung der Messungen mit Hilfe eines 3D-Lasers zu realisieren. Auf diese Weise können Schwingformen nicht nur punktuell, wie bisher mit einem Einfach-Vibrometer aufgenommen werden, sondern über ein definiertes Raster auf der Oberfläche des Probekörpers. Weiterhin sollen Probekörper verschiedener Geometrie und unterschiedliche Modenarten (Biegung, Torsion etc.) mit dem umgebauten Versuchsaufbau untersucht werden. Zur Validierung sollen die Ergebnisse mit Simulationsrechnungen verglichen werden.

---

<sup>1</sup>Finite-Elemente-Methode

<sup>2</sup>Computer-Aided Engineering

### **Aufgabenstellung:**

1. Literaturrecherche:

Machen Sie sich in den Standardwerken der dynamischen Strukturanalyse mit folgenden Themen vertraut. Geben Sie einen kurzen Überblick über alle für Ihre Arbeit relevanten Zusammenhänge.

- Experimentelle Modalanalyse
- Verwendung von 3D-Laser-Scannern für die experimentelle Modalanalyse
- Dämpfungsermittlung im Rahmen der experimentellen Modalanalyse (z.B. Stochastic Subspace Identification)

2. Experimentelle Untersuchungen:

Nutzen Sie den Versuchsaufbau des 3D-Laser für eine experimentelle Modalanalyse zur Visualisierung von Schwingformen verschiedener Probekörper. Entwickeln Sie ein Versuchsprogramm mit verschiedenen Probekörpern unterschiedlicher Geometrie und bestimmen Sie experimentell den Dämpfungsgrad für verschiedene Moden und Modenarten (Biegung, Torsion etc.) an einem Raster verteilt über die Oberfläche des Probekörpers. Wählen Sie eine geeignete Anregung, um einen quantitativen Vergleich zwischen Experiment und Simulation durchführen zu können. Diskutieren Sie mögliche Messfehler und schätzen Sie deren Einfluss ab.

3. Numerische Untersuchungen:

Zur Validierung der numerischen Modelle soll das Schwingungsverhalten ausgewählter Probekörper, die experimentell untersucht wurden, mittels FE-Modellen untersucht werden. Dabei sollen die eingesetzten Dämpfungsmodelle die unterschiedlichen Dämpfungskennwerte für verschiedene Schwingungsarten sowie die Frequenzabhängigkeit möglichst berücksichtigen. Simulationsergebnisse und Ergebnisse experimenteller Untersuchungen sollen verglichen werden.

Dokumentieren Sie Ihre Arbeit in schriftlicher Form. Alle erstellten Modelle sollen in digitaler Form archiviert und der Arbeit als DVD beigelegt werden. Der Stand der Bearbeitung ist regelmäßig vorzustellen.

### **Abgabe der Arbeit:**

Die Arbeit ist in digitaler und gebundener Form (zwei Exemplare) abzugeben. Es gilt die aktuell zutreffende Prüfungsordnung der Fakultät Bauingenieurwesen.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke

# Inhaltsverzeichnis

<b>Ausgangssituation und Zielstellung</b>	<b>2</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>7</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1 Analytische Modalanalyse . . . . .	10
2.1.1 Das ungedämpfte System . . . . .	11
2.1.2 Das viskos gedämpfte System . . . . .	13
2.1.3 Die erzwungene Schwingung . . . . .	17
2.2 Experimentelle Modalanalyse . . . . .	20
2.2.1 Funktionsweise des 3D-Laser-Scanners . . . . .	20
2.2.2 Experimentelle Modalanalyse mit dem 3D-Laser-Scanner . . . . .	23
2.3 Dämpfungsermittlung in der experimentellen Modalanalyse . . . . .	24
2.3.1 Was ist Dämpfung? . . . . .	24
2.3.2 Vorgehen zur Dämpfungsermittlung . . . . .	24
2.4 Abgleich zwischen experimenteller und analytischer Modalanalyse . . . . .	27
<b>3 Durchführung</b>	<b>28</b>
3.1 Versuchsaufbau . . . . .	28
3.2 Versuchsdurchführung . . . . .	30
3.3 Analytisches Referenzmodell . . . . .	32
3.4 Datenverarbeitung . . . . .	34
<b>4 Auswertung der Messdaten</b>	<b>35</b>
4.1 Genauigkeit der Messergebnisse . . . . .	36
4.1.1 Abweichung der Messpunktpositionen . . . . .	38
4.1.2 Abweichung der Frequenz . . . . .	40
4.1.3 Curvefitting Einstellungen in LabView . . . . .	42
4.1.4 Abweichung der Dämpfung . . . . .	45
4.1.5 Einfluss der Messsystemkonfiguration . . . . .	47
4.2 Messung der Eigenfrequenzen . . . . .	48
4.2.1 Vergleich der Eigenfrequenzen . . . . .	49
4.2.2 Vergleich der Eigenformen . . . . .	50
4.2.3 Vergleich der Amplituden . . . . .	53
4.3 Dämpfungsgrad . . . . .	54
4.3.1 Einfluss der Aufhängung . . . . .	54
4.3.2 Dämpfung von Blech 1 . . . . .	56
<b>5 Ergebnisbewertung</b>	<b>60</b>
5.1 Kritische Betrachtung der Ergebnisse . . . . .	60



5.2 Zusammenfassung . . . . .	61
5.3 Ausblick . . . . .	62
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>64</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>65</b>
<b>Literatur</b>	<b>66</b>
<b>Anhang</b>	<b>67</b>
<b>A Leitfaden zum Arbeiten mit dem PSV-3D-400</b>	<b>68</b>
<b>B Messeinstellungen</b>	<b>74</b>
B.1 Einstellungen der Messung 1502031200 . . . . .	74
B.2 Einstellungen der Messung 1501201545 . . . . .	76
B.3 Einstellungen der Messung 1501211010 . . . . .	78
B.4 Einstellungen der Messung 1501201100 . . . . .	80
B.5 Einstellungen der Messung 1501211205 . . . . .	82
B.6 Einstellungen der Messung 1501211353 . . . . .	84
B.7 Einstellungen der Messung 1503300940 . . . . .	86
B.8 Einstellungen der Messung 1503301315 . . . . .	88
<b>C Eigenmoden</b>	<b>90</b>
C.1 Gemessene Eigenmoden . . . . .	90
C.2 Simulierte Eigenmoden . . . . .	91
C.3 Komponenten von Mode 7 . . . . .	92
C.4 Komponenten von Mode 8 . . . . .	93
C.5 Komponenten von Mode 9 . . . . .	94
<b>D Dämpfung des BSB 1 (CB)</b>	<b>95</b>
D.1 Dämpfung Mode 7 - 45,4 Hz . . . . .	95
D.2 Dämpfung Mode 8 - 53,2 Hz . . . . .	96
D.3 Dämpfung Mode 9 - 111,3 Hz . . . . .	97

## Symbolverzeichnis

$e$	Eulersche Zahl	2,71828182846
$\pi$	Kreiszahl Pi	3,14159265359
$j$	Imaginäre Einheit	$\sqrt{-1}$
$v$	Geschwindigkeit	$m/s$
$c_0$	Lichtgeschwindigkeit	299792458 $m/s$
$\phi$	Phase	$rad$
$\lambda$	Wellenlänge	$m$
$\lambda$	Eigenwert	
$\zeta$	Dämpfungsgrad	[ - ]
$\Lambda$	Logarithmische Dekrement	[ - ]
$T$	Intervall	$s$
$t$	Zeit	$s$
$f = 1/T$	Frequenz	$s^{-1} = Hz$
$\omega = 2\pi \cdot f$	Kreisfrequenz	$rad \cdot s^{-1}$
$\omega$	Eigenfrequenz	$Hz$
$\alpha(\omega)$	Antwortfunktion (FRF)	
$\mathbb{Z}$	Ganze Zahl	
$ \cdot $	Betrag eines Wertes	
$\{\cdot\}^*$	Konjugiert komplexes Element	$a + jb \rightarrow a - jb$
$\dot{v}(t), \ddot{x}(t), \dots$	Ableitung nach der Zeit	$\frac{dv}{dt}, \frac{d^2x}{dt^2}$
$\mathbf{u}, \mathbf{v}, \hat{\mathbf{u}}, \dot{\mathbf{v}}, \dots$	Vektoren	$\{\cdot\}_{1 \times n}$
$\mathbf{M}, \mathbf{K}, \mathbf{U}, \hat{\mathbf{U}}, \dots$	Matrizen	$\{\cdot \cdot \cdot\}_{m \times n}$

## 1 Einführung

Beginnt das Lenkrad eines Autos bei hohen Geschwindigkeiten zu flattern oder eine Brücke beim Darübergehen zu schwingen, so verursacht dieses Verhalten bei uns Unbehagen. Doch auch ohne, dass es für den Menschen direkt spürbar ist, befindet sich unsere Umwelt in Schwingung. Abhängig von der Intensität und der Frequenz der Schwingungen, welche auf Mobilien und Immobilien einwirken, wird deren Dauerhaftigkeit beeinträchtigt. Daher wird im Bauwesen, aber auch in der Automobilindustrie und weiteren Industriezweigen versucht, zuverlässige Vorhersagen zu treffen, unter welchen Umständen technische Konstruktionen (elastomechanische Systeme) durch Schwingungen beeinträchtigt werden.

Aufschluss über die Dauerhaftigkeit von solchen Systemen kann erlangt werden, in dem die vom System umgesetzte Energie gemessen wird. Dieses Verhalten, weniger der gleichen Energieform an die Umwelt zurückzugeben als in das System eingetragen wurde, nennt sich Dämpfung. Je größer also die Energiedissipation eines Systems ist, desto größer ist seine Dämpfung. Da im Resonanzfall das System die größten Schäden erleiden oder verursachen kann, wird im Vorhinein das Dämpfungsverhalten berechnet. Zur Verifizierung der Berechnungen wird versucht die gleichen Parameter an realen Konstruktionen festzustellen. Das geschieht entweder durch Tests an Prototypen oder Versuchen am fertigen Bauwerk.

Im Rahmen dieser Masterarbeit arbeiten das Institut für Strukturmechanik (ISM) und die Professur Bauphysik zusammen mit der Material Forschungs- und Prüfanstalt (MFPA) der Bauhaus-Universität Weimar. Mit dem neuen Messsystem sollen neue Erkenntnisse in der Dämpfungsermittlung gewonnen werden. Ziel ist es, die bisher im Rahmen einer Bachelor-[8] und Studienarbeit [10] gewonnenen Messergebnisse mit einem 3D-Laser-Scanner zu verifizieren und weitere Möglichkeiten der Anwendung zu erkunden. Im Gegensatz zum bisher verwendeten Einpunktmesssystem lassen sich mit dem 3D-Laser Informationen aus allen drei Raumrichtungen gewinnen. Augenmerk wird darauf gelegt werden, in welchem Maße die Messergebnisse mit dem 3D-Laser reproduzierbar und belastbar sind und wie groß die Unterschiede sowohl zu den bisherigen Arbeiten als auch zu numerischen Simulationen sind. Durchgeführt werden die Versuche an einem Pkw-Bremsenschutzblech (BSB) aus Aluminium (vgl. Bild 1.1).



Bild 1.1: Bremsenschutzblech mit vier Bohrungen aus Aluminium. Sein Durchmesser beträgt etwa 36 cm und sein Gewicht ca. 160 g.

## 2 Grundlagen

Eingangs angesprochene Parameter wie Dämpfung und Eigenschwingung können sowohl gemessen als auch berechnet werden. Dafür müssen die betrachteten Systeme in Modelle überführt werden, welche mit den zur Verfügung stehenden Mitteln analysiert werden können. Es wird versucht, diese Modelle sowohl mathematisch als auch physikalisch so genau wie nötig abzubilden, um die erforderlichen Parameter aus ihnen zu extrahieren. Dieses Kapitel erklärt sowohl die mathematischen Grundlagen, mit welchen die realen Systeme versucht werden zu simulieren als auch die Grundlagen des verwendeten Messsystems und der Methoden, die gesuchten Parameter experimentell festzustellen.

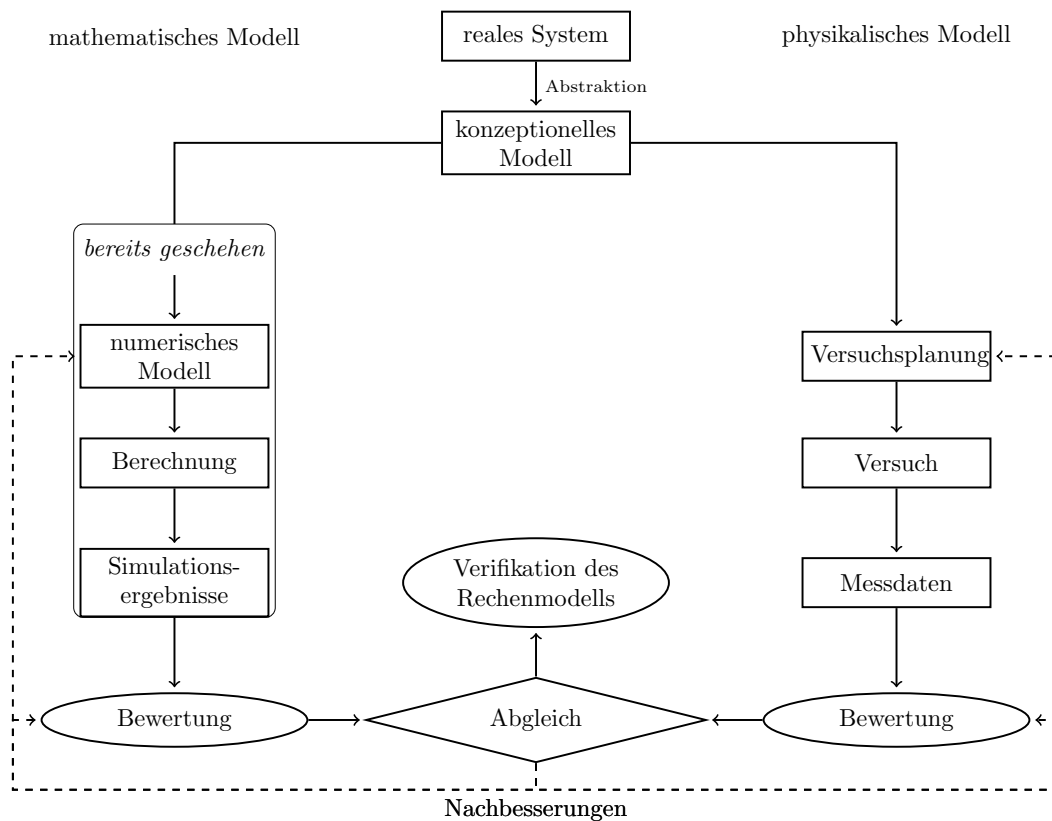


Bild 2.1: Vorgehen für Systemanalyse und Systemidentifikation. Gestrichelt ist dargestellt, in welchen Bereichen nach einem nicht zufrieden stellenden Abgleich der Daten Modifikationen stattfinden.

Wie Bild 2.1 zeigt, werden die betrachteten realen Systeme durch Abstraktion in konzeptionelle Modelle verwandelt. Diese bilden das ursprüngliche System in den benötigten Dimensionen derart ab, dass die gesuchten Parameter daraus einfacher abgeleitet werden können. Sowohl die Ergebnisse der mathematischen Simulation als auch die der Versuchsreihen müssen anschließend bewertet werden. Unsicherheiten, resultierend aus der Genauigkeit der Abbildung oder der Präzision der Messinstrumente, müssen in die Ergebnisse einfließen, bevor sie miteinander verglichen werden. Diese Unsicherheiten sind ein Maß der Genauigkeit der vorgenommenen Analyse.

Im Rahmen einer Studienarbeit [10] wurden bereits Parameter zu den in dieser Arbeit verwendeten Bremsenschutzblechen gesammelt. Hier diente ein schon bestehendes Rechenmodell als Referenz. Die Ergebnisse dieser Masterarbeit werden sowohl mit jenen des Rechenmodells als auch den bereits experimentell ermittelten Daten verglichen.

## 2.1 Analytische Modalanalyse

Die analytische Modalanalyse beschreibt, wie die vorgegebenen Modelle in FEM-Programmen dargestellt und aus ihnen die gesuchten Parameter berechnet werden. Dieses Kapitel erklärt daher, wie aus dem räumlichen Modell mit vorgegebener Masse, Steifigkeit und Dämpfung das modale Modell wird, aus welchem die Eigenfrequenzen und -formen abgeleitet werden können. Der letzte Schritt wird sein, aus dem modalen Modell das Antwortmodell zu generieren. Die daraus generierte FRF<sup>3</sup> entspricht dem Antwortsignal der experimentellen Modalanalyse. Aus ihm lassen sich die experimentell ermittelten Parameter ableiten.

Der erste Teil dieses Kapitels bezieht sich auf Hans Günter Natkes Buch *Einführung in die Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse* [7] aus dem Jahre 1992. Ab dem Abschnitt *Allgemeine Annahme* bezieht sich das Kapitel auf David John Ewins Buch *Modal testing - theory, practice and application* [4] aus dem Jahre 2000. Anderweitige Quellen sind gesondert kenntlich gemacht.

Bei elastomechanischen Systemen können unterschiedliche Parameter identifiziert werden. Neben den direkten Größen wie Dämpfungs-, Trägheits- oder Steifigkeitsdaten können auch indirekte Parameter wie die Eigenschwingungs- (Modal-) größen festgestellt werden. Zu den Modalgrößen zählen Eigenkreisfrequenz, Eigenformen und modale Dämpfungsgrade. Die Modalana-

---

<sup>3</sup>Frequency Response Function

lyse ist daher als ein Teil der Parameteridentifikation zu betrachten. Die Identifizierung direkter und indirekter Größen schließt sich indes nicht gegenseitig aus. Je mehr Größen bekannt sind, desto einfacher ist es, die Unbekannten zu ermitteln. Aber auch ohne oder mit nicht hinreichenden Informationen über ein System können in einer ersten, nichtparametrischen Identifikation Aussagen über u.a. das Linearitäts- und Dämpfungsverhalten und über die Freiheitsgrade getroffen werden.

Durch die digitale Bearbeitung der Modelle der Messungen und Informationen werden die Problemstellungen diskretisiert. Das bedeutet, dass sowohl die Zahl der erfassten Frequenzintervalle als auch die der ermittelbaren Freiheitsgrade endlich ist. Es werden daher ausschließlich diskrete endlichdimensionale Systeme zugrunde gelegt.

### 2.1.1 Das ungedämpfte System

Das ungedämpfte System stellt die idealisierteste Variante von elastomechanischen Systemen dar. Die Bewegungsgleichung des ungedämpften Systems mit  $n$  Freiheitsgraden lautet:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (2.1)$$

Die Trägheitsmatrix  $\mathbf{M}$  und die Steifigkeitsmatrix  $\mathbf{K}$  besitzen die Dimensionen  $n \times n$ . Der Verschiebungsvektor  $\mathbf{u}(t)$  und der Erregungsvektor  $\mathbf{f}(t)$  besitzen die Dimension  $n \times 1$ . Die Eigenschwingungen des Systems folgen aus den Bewegungsgleichungen (2.1) für  $\mathbf{f}(t) = 0$  und führen mit dem Produktansatz

$$\mathbf{u}(t) = \hat{\mathbf{u}}_0 e^{j\omega_0 t} \quad (2.2)$$

auf das Matritzeigenwertproblem

$$(-\omega_0^2 \mathbf{M} + \mathbf{K})\hat{\mathbf{u}}_0 = 0 \quad . \quad (2.3)$$

Das bedeutet, die  $n$  Eigenwerte sind  $\lambda_0 := \omega_0^2$ , reell, positiv oder höchstens gleich Null. Zu jedem Eigenwert  $\lambda_{0i}$  gehört ein reell normierbarer Eigenvektor  $\hat{\mathbf{u}}_{0i}$  mit  $i = 1, \dots, n$ . Eigenformen, welche zu unterschiedlichen Eigenfrequenzen gehören, sind im Allgemeinen orthogonal zueinander ( $\delta_{ik}$  ist das Kroneckersche Delta):

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{u}}_{0i}^T \mathbf{M} \hat{\mathbf{u}}_{0k} &= \begin{cases} 0 & \text{wenn } i \neq k \\ m_{gi} \delta_{ik} & \text{wenn } i = k \end{cases} & \text{Massenorthogonalität} \\ \hat{\mathbf{u}}_{0i}^T \mathbf{K} \hat{\mathbf{u}}_{0k} &= \begin{cases} 0 & \text{wenn } i \neq k \\ k_{gi} \delta_{ik} & \text{wenn } i = k \end{cases} & \text{Steifigkeitsorthogonalität} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Wählt man als reguläre Modalmatrix  $\hat{\mathbf{U}}_0 := (\hat{\mathbf{u}}_{01}, \dots, \hat{\mathbf{u}}_{0n})$  und  $\Lambda_0 := \text{diag}(\lambda_{0i})$ , so kann das Matritzeigenwertproblem (2.3) als Matritzengleichung folgendermaßen geschrieben werden:

$$-\mathbf{M} \hat{\mathbf{U}}_0 \Lambda_0 + \mathbf{K} \hat{\mathbf{U}}_0 = \mathbf{0} \quad (2.5)$$

Die verallgemeinerten Orthogonalitätsbedingungen lauten daraus folgend:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_g &:= \hat{\mathbf{U}}_0^T \mathbf{M} \hat{\mathbf{U}}_0 = \text{diag}(m_{gi}) \\ \mathbf{K}_g &:= \hat{\mathbf{U}}_0^T \mathbf{K} \hat{\mathbf{U}}_0 = \text{diag}(k_{gi}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Die Transformation mit der Modalmatrix überführt folglich die Bewegungsgleichung (2.1) in  $n$  unabhängige Differentialgleichungen. Die Eigenfrequenzen  $\omega_{0i}$  des Systems sind

$$\omega_{0i} = |\sqrt{\lambda_{0i}}| = \sqrt{\frac{k_{0i}}{m_{0i}}} \quad \text{mit } i = 1, \dots, n \quad (2.7)$$

und die Eigenvektoren beschreiben die Eigenformen  $\hat{\mathbf{u}}_{0i}$  als harmonische Schwingung des Systems

$$\mathbf{u}_{0i}(t) = \hat{\mathbf{u}}_{0i}(e^{j\omega_{0i}t} + e^{-j\omega_{0i}t}) = 2\hat{\mathbf{u}}_{0i} \cos \omega_{0i}t \quad \text{mit } i = 1, \dots, n \quad (2.8)$$



### 2.1.2 Das viskos gedämpfte System

Reale Systeme sind in der Regel aber nicht frei schwingend. Sie besitzen meist Elemente, welche die Schwingung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dämpfen. Die Bewegungsgleichung eines viskos gedämpften Systems mit  $n$  Freiheitsgraden lautet:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (2.9)$$

Die viskose Dämpfungsmatrix  $\mathbf{C}$  besitzt wie  $\mathbf{M}$  und  $\mathbf{K}$  die Dimensionen  $n \times n$ . Über den Ansatz:

$$\mathbf{u}(t) = \hat{\mathbf{u}}e^{\lambda t} \quad \text{mit } \lambda = \pm j\omega \quad (2.10)$$

und  $\mathbf{f}(t) = 0$  wird Gleichung (2.9) in folgendes Eigenwertproblem überführt:

$$(\lambda^2 \mathbf{M} + \lambda \mathbf{C} + \mathbf{K})\hat{\mathbf{u}} = 0 \quad (2.11)$$

Die Matrizen sind symmetrisch von  $n$ -ter Ordnung mit reellen Koeffizienten,  $\mathbf{M}$  ist positiv definit<sup>4</sup> und  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$  sind nicht negativ definit<sup>5</sup>.

Zur Lösung der Gleichung (2.9) ist eine von zwei Annahmen zu treffen. Die eine, allgemeine, Annahme ist, dass  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  und  $\mathbf{K}$  gleichermaßen durch die Multiplikation mit der Modalmatrix  $\hat{\mathbf{U}}$  orthogonalisiert werden. Da aber die Dämpfungsmatrix  $\mathbf{C}$  nur unter bestimmten Bedingungen diese Orthogonalitätsbedingungen erfüllt, gibt es eine zweite Annahme. Diese lautet, dass die viskose Dämpfungsmatrix  $\mathbf{C}$  linear von der Trägheitsmatrix  $\mathbf{M}$  und der Steifigkeitsmatrix  $\mathbf{K}$  abhängig ist:

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (2.12)$$

Die Annahme, dass das System derart proportional gedämpft ist, wird Bequemlichkeitshypothese (auch Rayleigh-Dämpfung) genannt.

---

<sup>4</sup>besitzt nur positive Eigenwerte

<sup>5</sup>besitzen nicht ausschließlich negative Eigenwerte

**Allgemeine Annahme**

Die Eigenwerte des Systems (2.9), welche aus der Gleichung (2.11) folgen, sind reell oder komplex. Eigenwert und zugehöriger Eigenvektor treten konjugiert komplex auf:

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_r, \lambda_r^* \\ \hat{\mathbf{u}}_r, \hat{\mathbf{u}}_r^* \end{array} \right\} \text{ mit } r = 1, \dots, n \quad (2.13)$$

Die Eigenwerte werden dann in der Form

$$\lambda_r = \omega_r \left( -\zeta_r + j \sqrt{1 - \zeta_r^2} \right) \quad \text{geschrieben, wobei} \quad (2.14)$$

$$\omega_r = \sqrt{\frac{k_r}{m_r}} \quad \text{die Eigenfrequenz der Mode } r \text{ und} \quad (2.15)$$

$$\zeta_r = \frac{c_r}{2 \sqrt{k_r m_r}} \quad \text{die Modale Dämpfung der Mode } r \text{ darstellen.} \quad (2.16)$$

Die Eigenschwingungen der reellen Eigenwerte sind beschreibbar durch

$$\mathbf{u}_C(t) = \hat{\mathbf{u}}_C e^{\lambda_C^{\text{re}} t} \quad (2.17)$$

und die der komplexen durch [7]

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_C(t) &= \hat{\mathbf{u}}_C e^{\lambda_C t} + \hat{\mathbf{u}}_C^* e^{\lambda_C^* t} \\ &= 2e^{\lambda_C^{\text{re}} t} (\hat{\mathbf{u}}_C^{\text{re}} \cos \lambda_C^{\text{im}} t - \hat{\mathbf{u}}_C^{\text{im}} \sin \lambda_C^{\text{im}} t) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Die allgemeinen Orthogonalitätsbedingungen dieser Eigenvektoren folgen aus:

$$(\lambda_r^2 \mathbf{M} + \lambda_r \mathbf{C} + \mathbf{K}) \hat{\mathbf{u}}_r = \mathbf{0} \quad (2.19)$$

Wird von links mit  $\hat{\mathbf{u}}_r^T$  multipliziert, so ist das Ergebnis ein skalarer Wert und kein Vektor mehr:

$$\hat{\mathbf{u}}_r^T (\lambda_r^2 \mathbf{M} + \lambda_r \mathbf{C} + \mathbf{K}) \hat{\mathbf{u}}_r = 0 \quad (2.20)$$

Der Ergebnisvektor kann auch transponiert werden, wenn mit dem transponierten Eigenvektor von links multipliziert wird. Hier wird  $\lambda_q$  und  $\hat{\mathbf{u}}_q$  genutzt:

$$\hat{\mathbf{u}}_q^T (\lambda_q^2 \mathbf{M} + \lambda_q \mathbf{C} + \mathbf{K}) = \mathbf{0}^T \quad (2.21)$$

Wird nun mit  $\hat{\mathbf{u}}_q$  von rechts multipliziert und von der Gleichung (2.20) abgezogen, so lautet das Ergebnis

$$(\lambda_r^2 - \lambda_q^2)\hat{\mathbf{u}}_q^T \mathbf{M} \hat{\mathbf{u}}_r + (\lambda_r - \lambda_q)\hat{\mathbf{u}}_q^T \mathbf{C} \hat{\mathbf{u}}_r = 0 \quad (2.22)$$

Da  $(\lambda_r^2 - \lambda_q^2) = (\lambda_r - \lambda_q)(\lambda_r + \lambda_q)$ , gilt als erste Orthogonalitätsbedingung für  $(\lambda_r \neq \lambda_q)$ :

$$(\lambda_r + \lambda_q)\hat{\mathbf{u}}_q^T \mathbf{M} \hat{\mathbf{u}}_r + \hat{\mathbf{u}}_q^T \mathbf{C} \hat{\mathbf{u}}_r = 0 \quad (2.23)$$

Die zweite Orthogonalitätsbedingung errechnet sich, indem Gleichung (2.20) mit  $\lambda_q$  und Gleichung (2.21) mit  $\lambda_r$  multipliziert und dann von einander abgezogen werden:

$$\lambda_r \lambda_q \hat{\mathbf{u}}_q^T \mathbf{M} \hat{\mathbf{u}}_r + \hat{\mathbf{u}}_q^T \mathbf{C} \hat{\mathbf{u}}_r = 0 \quad (2.24)$$

Nur wenn diese beiden Gleichungen (2.23) und (2.24) zutreffen, ist das viskos gedämpfte System orthogonal.

Für den Fall, das  $r$  und  $q$  ein komplex konjugiertes Paar sind, so folgt:

$$\lambda_q = \omega_r \left( -\zeta_r - j \sqrt{1 - \zeta_r^2} \right) \quad \text{also auch} \quad (2.25)$$

$$\hat{\mathbf{u}}_q = \hat{\mathbf{u}}_r^* \quad (2.26)$$

Werden diese Ergebnisse in (2.23) eingesetzt, so lautet das Ergebnis:

$$-2\omega_r \zeta_r \hat{\mathbf{u}}_r^H \mathbf{M} \hat{\mathbf{u}}_r + \hat{\mathbf{u}}_r^H \mathbf{C} \hat{\mathbf{u}}_r = 0 \quad (2.27)$$

Wobei  $\{\cdot\}^H = \{\cdot\}^* T$  die Darstellung der komplex konjugiert transponierten oder hermetischen Matrix ist. Wird Gleichung (2.27) umgestellt, lautet das Ergebnis:

$$2\omega_r \zeta_r = \frac{\hat{\mathbf{u}}_r^H \mathbf{C} \hat{\mathbf{u}}_r}{\hat{\mathbf{u}}_r^H \mathbf{M} \hat{\mathbf{u}}_r} = \frac{c_r}{m_r} \Rightarrow \zeta_r = \frac{c_r}{2 \sqrt{k_r m_r}} \quad (2.28)$$

Werden Gleichung (2.25) und (2.26) in (2.24) eingesetzt, lautet das ähnliche Ergebnis:

$$\omega_r^2 \hat{\mathbf{u}}_r^H \mathbf{M} \hat{\mathbf{u}}_r - \hat{\mathbf{u}}_r^H \mathbf{K} \hat{\mathbf{u}}_r = 0 \quad (2.29)$$

welches, wenn es umgestellt wird zu

$$\omega_r^2 = \frac{\hat{\mathbf{u}}_r^H \mathbf{K} \hat{\mathbf{u}}_r}{\hat{\mathbf{u}}_r^H \mathbf{M} \hat{\mathbf{u}}_r} = \frac{k_r}{m_r} \quad \text{führt.} \quad (2.30)$$

### Bequemlichkeitshypothese

Die Annahme, dass die Dämpfungsmatrix  $\mathbf{C}$  des viskos gedämpften Systems (2.9) proportional zur Trägheitsmatrix  $\mathbf{M}$  und der Steifigkeitsmatrix  $\mathbf{K}$  ist (2.12), hat den Vorteil, dass die Zahl der Eigenvektoren gleich jener des ungedämpften Systems ist  $\hat{\mathbf{U}}_C = \hat{\mathbf{U}}_0$ . Damit gibt es auch keine komplexen Eigenwerte. Auch sind die Orthogonalitätsbedingungen einfacher

$$\mathbf{K} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C} = \mathbf{C} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} \quad (2.31)$$

damit die Modalmatrix  $\hat{\mathbf{U}}_0$  die Dämpfungsmatrix diagonalisiert [7]:

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= \hat{\mathbf{U}}_0^T \mathbf{C} \hat{\mathbf{U}}_0 = \text{diag}(c_r) \\ c_r &= \alpha m_r + \beta k_r = m_r (\alpha + \omega_{0r}^2 \beta) \quad . \end{aligned} \quad (2.32)$$

Die Eigenfrequenzen lauten daher:

$$\omega_r' = \bar{\omega}_r \sqrt{1 - \zeta_r^2} \quad \text{mit} \quad \zeta_r = \alpha \frac{\bar{\omega}_r}{2} + \frac{\beta}{2\bar{\omega}_r} \quad \text{und} \quad \bar{\omega}_r = \sqrt{\frac{k_r}{m_r}} \quad (2.33)$$

Gerade für große Gleichungssysteme ist es ressourcenschonender, wenn FE-Modellen mit der Bequemlichkeitshypothese berechnet werden, als mit der allgemeinen Annahme. Der Rechenaufwand ist hier wesentlich geringer.

### 2.1.3 Die erzwungene Schwingung

Mit der erzwungenen Schwingung wird versucht, die Antwortfunktion des Systems, die FRF, darzustellen. Sie enthält sowohl die Informationen, welche bei der Anregung des Systems eingetragen werden, als auch jene, welche aus dem System extrahiert werden sollen. Die erzwungene viskos gedämpfte Schwingung wird nun folgend erläutert. Erzwungen bedeutet, dass die rechte Seite der Gleichung (2.9) nicht null ist. Es wird die Kraft  $f(t)$  eingetragen.

Ausgehend von der allgemeinen Bewegungsgleichung (2.9) und der Annahme

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{X}e^{j\omega t} \quad (2.34)$$

sowie der Voraussetzung, dass die Anregung eine harmonische Schwingung ist

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{F}e^{j\omega t} \quad (2.35)$$

kann die Gleichung der erzwungenen Schwingung folgendermaßen geschrieben werden:

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C} + \mathbf{K})\mathbf{X}e^{j\omega t} = \mathbf{F}e^{j\omega t} \quad (2.36)$$

Die Matrix der Systemantwort  $\alpha(\omega)$  lautet folglich:

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + j\omega \mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1} = \alpha(\omega) = \frac{\mathbf{X}}{\mathbf{F}} \quad (2.37)$$

Um die Darstellung der Systemantwort für den allgemeinen Fall der viskosen Dämpfung übersichtlich zu halten, wird der Vektor  $\mathbf{v}$  vom Rang  $2n$  definiert. Er soll sowohl die Verschiebungen  $\mathbf{x}$ , als auch die Geschwindigkeiten  $\dot{\mathbf{x}}$  enthalten. Diese Art der Darstellung nennt sich *Zustandsraum*.

$$\mathbf{v} = \left\{ \begin{array}{c} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{array} \right\}_{(2n \times 1)} \quad (2.38)$$

Die allgemeine Bewegungsgleichung (2.9) kann damit folgendermaßen dargestellt werden:

$$[\mathbf{C} : \mathbf{M}]_{n \times 2n} \dot{\mathbf{v}}_{2n \times 1} + [\mathbf{K} : \mathbf{0}]\mathbf{v} = \mathbf{0}_{n \times 1} \quad (2.39)$$

Da dieses System nur  $n$  Gleichungen hat, dafür aber  $2n$  Unbekannte, wird eine Einheitsmatrix in der Form

$$[\mathbf{M} : \mathbf{0}]\dot{\mathbf{v}} + [\mathbf{0} : -\mathbf{M}]\mathbf{v} = \mathbf{0} \quad \text{hinzugefügt.} \quad (2.40)$$

Zusammen hat das System dann folgende Form:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{v}} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M} \end{bmatrix} \mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (2.41)$$

Oder einfacher:

$$\mathbf{A}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{B}\mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (2.42)$$

Dieser Gleichung liegt nun ein gewöhnliches Eigenwertproblem zu Grunde, welches mit dem Ansatz  $\mathbf{v} = \mathbf{V}e^{\lambda t}$  gelöst werden kann:

$$(\lambda_r \mathbf{A} + \mathbf{B})\theta_r = \mathbf{0} \quad \text{mit } r = 1, \dots, 2n \quad (2.43)$$

Die Eigenwerte  $\lambda_r$  und die Eigenvektoren  $\theta_r$  treten dabei ebenso konjugiert komplex auf. Die Orthogonalitätsbedingungen sind:

$$\begin{aligned} \theta_r^T \mathbf{A} \theta_r &= \mathbf{a}_r \\ \theta_r^T \mathbf{B} \theta_r &= \mathbf{b}_r \end{aligned} \quad (2.44)$$

Aus ihnen kann

$$\lambda_r = -\frac{b_r}{a_r} \quad \text{abgeleitet werden.} \quad (2.45)$$

Der Kraftvektor für die erzwungene Schwingung hat im Zustandsraum diese Form:

$$\mathbf{P}_{(2n \times 1)} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (2.46)$$

Wird wieder von harmonischer Anregung ausgegangen, so ergeben die Gleichungen (2.38), (2.42) und (2.46) zusammen:

$$\mathbf{A} \begin{Bmatrix} j\omega \mathbf{X} \\ -\omega^2 \mathbf{X} \end{Bmatrix} + \mathbf{B} \begin{Bmatrix} \mathbf{X} \\ j\omega \mathbf{X} \end{Bmatrix} = \mathbf{P} \quad (2.47)$$

Oder einfacher:

$$(j\omega \mathbf{A} + \mathbf{B}) \begin{Bmatrix} \mathbf{X} \\ j\omega \mathbf{X} \end{Bmatrix} = \mathbf{P} \quad (2.48)$$

Die Matrix der Systemantwort lautet  $\alpha(\omega) = (j\omega\mathbf{A} + \mathbf{B})^{-1}$  in dem Term:

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{X} \\ j\omega\mathbf{X} \end{Bmatrix} = (j\omega\mathbf{A} + \mathbf{B})^{-1}\mathbf{P} \quad (2.49)$$

Daraus folgt:

$$\theta^T(j\omega\mathbf{A} + \mathbf{B})\theta = j\omega\mathbf{a}_r + \mathbf{b}_r = \theta^T\alpha(\omega)^{-1}\theta \quad (2.50)$$

Wird die vorige Gleichung invertiert und umgestellt, so ergibt sich:

$$\alpha(\omega) = \theta[j\omega\mathbf{a}_r + \mathbf{b}_r]^{-1}\theta^T \quad (2.51)$$

Wird die umgestellte Gleichung (2.45) eingefügt

$$\alpha(\omega) = \theta[a_r(j\omega - \lambda_r)]^{-1}\theta^T \quad (2.52)$$

und Gleichung (2.14) substituiert, ergibt sich daraus:

$$\alpha(\omega) = \theta \left[ a_r \left( \omega_r \zeta_r + j \left( \omega - \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2} \right) \right) \right]^{-1} \theta^T \quad (2.53)$$

Da sowohl Eigenwerte als auch Eigenvektoren in konjugiert komplexen Paaren auftreten, ergibt sich daraus für jedes Element der Antwortmatrix:

$$\alpha_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \left( \frac{\theta_{jr}\theta_{kr}}{a_r \left( \omega_r \zeta_r + j \left( \omega - \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2} \right) \right)} + \frac{\theta_{jr}^*\theta_{kr}^*}{a_r^* \left( \omega_r \zeta_r + j \left( \omega - \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2} \right) \right)} \right) \quad (2.54)$$

Setzt man die Eigenwerte in der Form  $\lambda_r = \omega_r(-\zeta_r + j\sqrt{1 - \zeta_r^2})$  ein, kann die Gleichung reduziert werden auf

$$\alpha_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{{}_r\mathbf{R}_{jk} + j\frac{\omega}{\omega_r}{}_r\mathbf{S}_{jk}}{\omega_r^2 - \omega^2 + 2j\omega\omega_r\zeta_r} \quad (2.55)$$

mit den Koeffizienten

$$\begin{aligned} {}_r\mathbf{R}_k &= 2 \left( \zeta_r \text{Re}_r \mathbf{G}_k - \text{Im}_r \mathbf{G}_k \sqrt{1 - \zeta_r^2} \right) \\ {}_r\mathbf{S}_k &= 2 \text{Re}_r \mathbf{G}_k \\ {}_r\mathbf{G}_k &= \frac{\theta_{kr}}{a_r} \theta_r \end{aligned} \quad (2.56)$$

## 2.2 Experimentelle Modalanalyse

Bei der experimentellen Modalanalyse werden Modalparameter wie Eigenfrequenz, Eigenform und Dämpfungsgrad durch Versuche am Messobjekt bestimmt. Um weder bei der Anregung noch bei der Messung die Eigenschaften des Messobjektes zu verändern ist es empfehlenswert, berührungslos zu arbeiten. Die Anregung kann dafür zum Beispiel, wie in dieser Arbeit, mit Lautsprechern erfolgen. Zur berührungslosen Messung können Laser verwendet werden. Ein flächiges Messverfahren ist das 3D-Laser-Scanning. Bei ihm wandert der Messpunkt benutzerdefiniert über das Messobjekt und kann an mehreren Stellen nacheinander die gewünschten Informationen aufnehmen. Die Funktionsweise dieses Messsystems sowie die Grundlagen der Parameterermittlung werden in diesem Kapitel erläutert.

### 2.2.1 Funktionsweise des 3D-Laser-Scanners

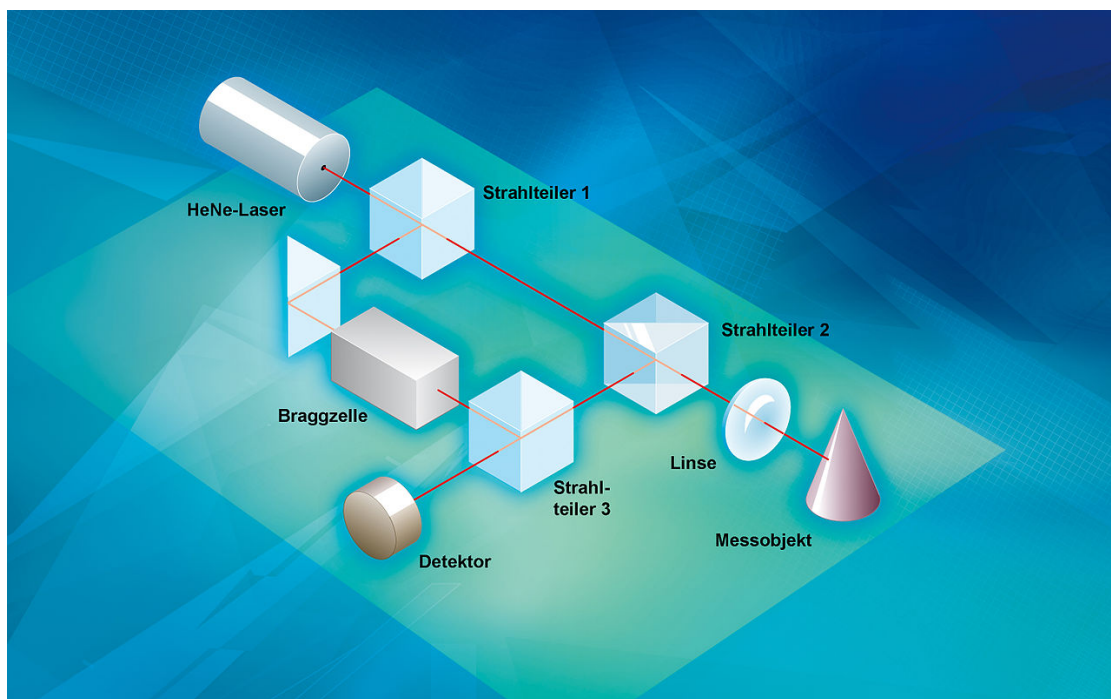


Bild 2.2: Aufbau des Laser-Doppler-Vibrometers der Firma Polytec [2]

3D-Laser-Scanner sind berührungslose Messinstrumente, welche eine Weiterentwicklung von Laser-Doppler-Vibrometern (kurz LDV) darstellen. Zur digitalen und damit diskreten Erfassung von analogen kontinuierlichen Informationen muss mit mehr als der doppelten zu erwartenden



Frequenz gemessen werden, um den Alias-Effekt zu vermeiden (Nyquist-Theorem). Mit lichtbasierten Messmethoden wie dem LDV können daher, abhängig vom Farbspektrum des Lichtes, sehr hohe Frequenzen gemessen werden. Der prinzipielle Aufbau des für diese Arbeit verwendeten LDV *PSV-400 Scanning Vibrometer* der Firma Polytec ist in Bild 2.2 dargestellt. Der Helium-Neon-Laser wird mit Hilfe eines Halbspiegels (*Strahlteiler 1*) geteilt. Ein Strahl dient nun als Referenz, der andere wird zur Messung verwendet. Nachdem der Messstrahl vom Messobjekt reflektiert wurde, werden beide Strahlen übereinander gelegt und auf eine Photozelle (*Detektor*) gerichtet.

Die Vibrometrie beruht auf dem Doppler-Effekt, welcher ausgehend von der Stauchung oder Dehnung zurückgeworfener Wellen Auskunft darüber gibt, ob und wie schnell sich ein Beobachtungsobjekt bewegt. Die Frequenzverschiebung  $f_D$  des vom Objekt zurückgesendeten Lichts beträgt daher

$$f_D = 2 \cdot \frac{v}{\lambda} \quad (2.57)$$

wobei  $v$  die Geschwindigkeit des Objektes und  $\lambda$  die Wellenlänge des ausgesendeten Lichts ist. Nach Umstellung der Formel ist, bei bekannter Wellenlänge des Lichts, die Geschwindigkeit des Objektes das Ergebnis. Das Vibrometer benutzt einen Helium-Neon-Laser mit einer Wellenlänge von 633 nm [1].

Mit Hilfe des Interferenztermes

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \quad (2.58)$$

lässt sich die Gesamtintensität  $I_{tot}$  aus der Intensität zweier Lichtstrahlen  $I_1$  und  $I_2$  ermitteln [5]. Da es sich bei einem LDV nur um einen Strahl mit einer Intensität handelt, gilt:

$$I_1 = I_2 \quad (2.59)$$

Arbeitet man mit der Annahme, dass die gemessenen Abstände alle ein Vielfaches der Wellenlänge des Lasers sind, so gilt auch für die Phase:

$$\phi_1 = \phi_2 \quad (2.60)$$

Abhängig von der reflektierten Frequenz  $f_2$ , oszilliert die Gesamtintensität nun zwischen Null und dem vierfachen der Einzelintensität des Lasers:

$$\begin{aligned} \text{für } f_1 - f_2 \in \mathbb{Z} \quad I_{tot} &= I_1 + I_1 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_1} \cdot 1 = 4I_1 \\ \text{für } f_1 - f_2 \in \mathbb{Z} - 0,5 \quad I_{tot} &= I_1 + I_1 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_1} \cdot -1 = 0 \end{aligned} \quad (2.61)$$

Da der Weg des Referenzstrahles konstant ist, bleibt auch seine Frequenz konstant. Der Weg des Messstrahles hingegen variiert und so ändert sich auch seine Frequenz. Dies führt zu den angegebenen Intensitätsschwankungen. Ein vollständiger Hell-Dunkel-Zyklus entspricht dabei der Verschiebung des zu messenden Objektes um eine halbe Frequenzlänge des Messstrahles, also um 316,5 nm. Anhand der Frequenz des Hell-Dunkel-Zyklus kann nun die Geschwindigkeit des Objektes errechnet werden. Da sich die Frequenzen eines sich mit gleicher Geschwindigkeit auf den LDV zu- oder von ihm wegbewegenden Objektes gleichen, wird dem Referenzstrahl in der Braggzelle<sup>6</sup> (siehe Bild 2.2) eine Schwebung von 40 MHz aufgetragen. Die so modulierte Frequenz zeigt an, in welche Richtung sich das Objekt bewegt. Steigt die Frequenz an, so bewegt sich das Objekt auf das LDV zu, sinkt sie ab, von ihm weg. Bewegt sich das Objekt nicht, so werden lediglich (zusätzlich zur wesentlich höheren Schwingungsfrequenz  $f = \frac{c_0}{633nm} = 474$  THz) die 40 MHz gemessen. [2]

---

<sup>6</sup>Optoakustisches Bauteil, welches mit Hilfe von Ultraschall die Eigenschaften von passierendem Licht modifiziert

### 2.2.2 Experimentelle Modalanalyse mit dem 3D-Laser-Scanner

Modalparameter können experimentell mit verschiedenen Methoden festgestellt werden. Je nachdem, ob nur ein Mode oder mehrere auf einmal ermittelt werden sollen, verändert sich das Vorgehen. Auch unterscheiden sich die Methoden hinsichtlich der gemessenen Daten. So können aus einzelnen gezielten oder breitbandigen Anregungen entweder nur eine<sup>7</sup> oder mehrere<sup>8,9</sup> Informationen extrahiert werden. Hier erklärt wird eine einfache und anschauliche Methode, aus den aufgenommenen Messsignalen die Eigenfrequenz und die Eigenform zu generieren.

Über das Messobjekt werden Messpunkte verteilt, deren Position zueinander bekannt sein muss. So wird das Objekt auf die Messpunkte diskretisiert. Es wird nun entweder mit einem breitbandigen (weißen) Rauschen oder wie in den durchgeführten Versuchen mit einem *Chirp*<sup>10</sup> angeregt. Gemessen werden dann, je nach eingesetztem Messsystem, die Auslenkung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung des Messobjektes in den Messpunkten. In der Fouriertransformation des Antwortsignals (vgl. Bild 2.3) sind an den Resonanzfrequenzen des gemessenen Punktes große Amplituden erkennbar. Diese Resonanzfrequenzen sind die Eigenfrequenzen. Durch die Zuweisung der Amplituden pro Eigenfrequenz zu den Messpunkten lassen sich die Amplituden des gesamten Blechs pro Frequenz darstellen. Über die Ableitung oder Integration des Geschwindigkeitssignals lässt sich auf die Verschiebung oder die Beschleunigung der einzelnen Messpunkte pro Eigenfrequenz schließen. Bei der Visualisierung dieser Informationen entsteht die Eigenform. Aus der Fouriertransformation (Bild 2.3) kann auch der Dämpfungskoeffizient abgeleitet werden. Die Grundlagen zur in dieser Arbeit verwendeten Methode beschreibt der nächste Abschnitt.

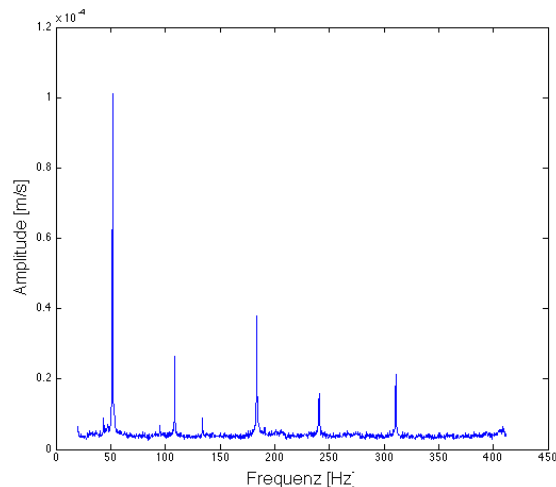


Bild 2.3: Fouriertransformiertes Signal: Als deutliche Spitzen sind die Amplituden der Resonanzfrequenzen, der Eigenfrequenzen zu erkennen.

<sup>7</sup>*SISO* - Methoden, Single Input Single Output

<sup>8</sup>*SIMO* - Methoden, Single Input Multi Output

<sup>9</sup>*MIMO* - Methoden, Multi Input Multi Output

<sup>10</sup>Harmonisches Signal, welches seine Frequenz exponentiell im vorgegebenen Spektrum steigert

## 2.3 Dämpfungsermittlung in der experimentellen Modalanalyse

Die Dämpfungsermittlung führt zum letzten in der experimentellen Modalanalyse noch nicht erläuterten Parameter: dem Dämpfungsgrad.

### 2.3.1 Was ist Dämpfung?

Die VDI-Richtlinie 3830 [9] definiert Dämpfung bei zeitabhängigen Vorgängen in mechanischen Systemen als irreversibel stattfindende Umwandlung mechanischer Energie in andere Energieformen. Hauptsächlich wird hierbei mechanische Energie in thermische Energie umgewandelt. Wird die umgewandelte Energie dem System nicht wieder zugeführt, so können auch elektromagnetische oder piezoelektrische Energieumwandlung zu Dämpfung führen.

Befinden sich die für die Dämpfung verantwortlichen Kräfte nach dem Freischneiden des betrachteten Systems innerhalb der Systemgrenzen, so wird die Dämpfung *innere Dämpfung* genannt. Beispiele hierfür sind Werkstoffdämpfung in Folge nichtelastischen Werkstoffverhaltens oder die Reibung zwischen Bauteilen. Liegen die Kräfte außerhalb der Systemgrenzen, so handelt es sich um *äußere Dämpfung*. Reibung mit dem umgebenden Medium, Körperschallabstrahlung in den Boden oder Schallabstrahlung in die Luft sind hierfür Beispiele.

Zudem existiert die *modale Dämpfung*. Sie wird, wie in Kapitel 2.1.2, aus der Bewegungsgleichung (2.9) berechnet und hat die Form

$$\zeta_i = \frac{c_i}{2\sqrt{k_i m_i}} \quad \text{mit } i=1, \dots, n \quad \text{vgl. Gleichung (2.16).}$$

### 2.3.2 Vorgehen zur Dämpfungsermittlung

Die Dämpfung ist Kennwert dafür, wie viel Energie ein Bauteil dissipiert. Sie ist, abhängig von der Eigenfrequenz, unterschiedlich groß [8][10]. Um die Dämpfung eines Bauteiles, die Bauteildämpfung, zu ermitteln, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Zum Auswerten der Messungen dieser Arbeit wird das logarithmische Dekrement verwendet. Weitere mögliche Methoden der Dämpfungsermittlung wie die Messung der Schwingungsamplituden in Resonanznähe (3dB-Dämpfung), die Ermittlung über Amplituden und Phasenwinkel oder mittels thermischer Energiebilanz seien der Vollständigkeit halber erwähnt, werden aber nicht genauer betrachtet.

Um die Dämpfung mit dem logarithmischen Dekrement feststellen zu können, müssen zunächst die Eigenfrequenzen des Messobjekts bestimmt werden (vgl. Abschnitt 2.2.2). Das Messobjekt ist nun in den einzelnen Eigenfrequenzen harmonisch anzuregen, bis sich ein stationärer, also nicht weiter aufschwingender, Schwingungszustand eingestellt hat. Ist dies der Fall, wird die Erregerquelle entfernt und das Abklingverhalten des Messobjekts aufgezeichnet.

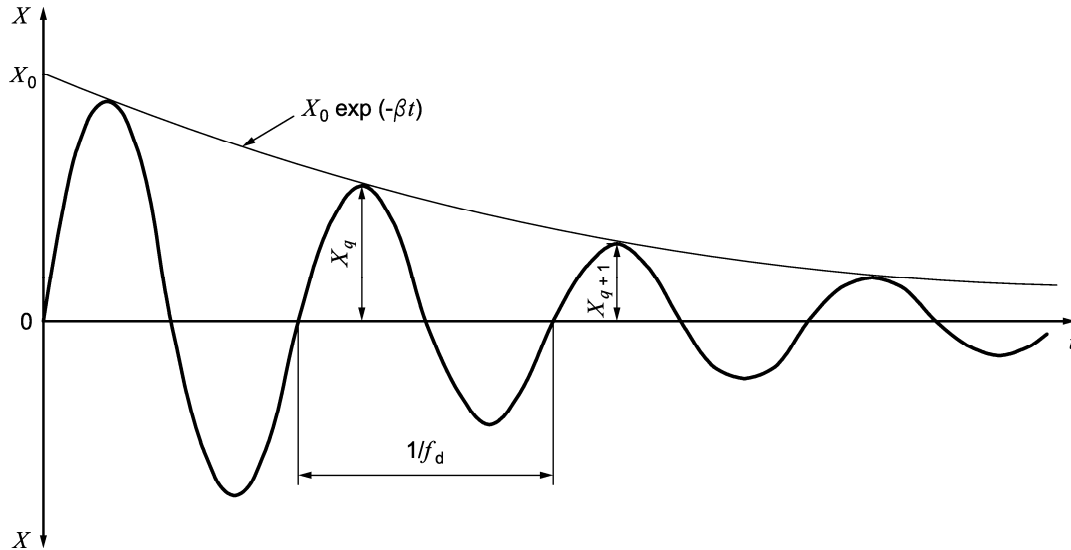


Bild 2.4: Gedämpfte Schwingung der Periode  $1/f_d$  mit  $X$  als zeitabhängiger Deformation oder Deformationsgeschwindigkeit.  $X_q$  ist die Amplitude der  $q$ -ten Periode. Der Anfangswert der Einhüllenden, der Maximalwerte  $X_0$  und die Abklingkonstante  $\beta$  bestimmen die Einhüllende des exponentiellen Abklingens der Periodenamplituden. [6]

Die in Bild 2.4 dargestellte Schwingung  $X(t)$  hat die Funktion:

$$X(t) = X_0 e^{-\beta t} \cdot \sin 2\pi f_d t \quad (2.62)$$

Gemäß der Norm DIN EN ISO 6721-1 [6] berechnet sich das logarithmische Dekrement  $\Lambda$  aus zwei aufeinanderfolgenden Maximalwerten der gedämpften Schwingung des viskoelastischen Systems mit der Gleichung:

$$\Lambda = \ln \frac{X_q}{X_{q+1}} \quad (2.63)$$

In Abhängigkeit von der Abklingkonstanten  $\beta$  und der Frequenz  $f_d$  kann das logarithmische Dekrement auch durch

$$\Lambda = \frac{\beta}{f_d} = \beta t \quad (2.64)$$

dargestellt werden. Es handelt sich dabei um eine einheitenlose Größe. Der Dämpfungsgrad  $\zeta$  steht mit der Abklingkonstanten über das *Lehrsche Dämpfungsmaß* in der Beziehung:

$$\zeta = \frac{\beta}{\omega} \quad (2.65)$$

Ausgehend von schwach gedämpften Systemen  $\zeta < 1$  gilt  $\omega_d = \omega \sqrt{1 - \zeta^2}$ . Daraus folgt:

$$\zeta = \frac{\Lambda}{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda^2}} \quad (2.66)$$

## 2.4 Abgleich zwischen experimenteller und analytischer Modalanalyse

Nachdem das Modell sowohl analytisch berechnet als auch experimentell untersucht wurde, braucht es jetzt Methoden, um die Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Nur so können Schlüsse daraus gezogen werden, ob die analytische und physikalische Modellbildung erfolgreich war oder ob es weiterer Anstrengungen bedarf, die Modelle zu diskretisieren.

Die modalen Parameter wie Eigenfrequenz und Dämpfungsgrad sind skalare Werte, welche direkt miteinander ins Verhältnis gesetzt werden können. Der Abgleich der Eigenvektoren und der Eigenformen bedarf etwas mehr Aufwand. Eine auch in dieser Arbeit angewendete Methode ist, neben dem optischen Abgleich der Darstellung der analytisch errechneten und gemessenen Eigenform, der Vergleich der Amplituden bzw. Verschiebungswerte. Dafür werden an den zu den Messpunkten auf dem Messobjekt korrespondierenden Knoten des FE-Modelles die entsprechenden Werte extrahiert. Diese können nun, ebenso wie die Parameter Frequenz oder Dämpfungsgrad, direkt ins Verhältnis gesetzt werden. Die numerisch ermittelten Werte sind in der Regel normiert, was nur einen Vergleich der Verhältnisse zwischen Analyse und Versuch zulässt. Etwas mehr Aufschluss kann das  $MAC^{11}$  bieten [3]. Davon ausgehend, dass die Eigenvektoren des analytischen Modells linear zu jenen des Versuchsmodells sind, können beide über folgende Formel miteinander verglichen werden:

$$MAC_{cdr} = \frac{|\hat{\mathbf{u}}_{dr}^H \hat{\mathbf{u}}_{cr}|^2}{\hat{\mathbf{u}}_{dr}^H \hat{\mathbf{u}}_{dr} \hat{\mathbf{u}}_{cr}^H \hat{\mathbf{u}}_{cr}} \quad (2.67)$$

$d$  und  $c$  geben dabei die Herkunft der Eigenvektoren  $\hat{\mathbf{u}}$ ,  $r$  den zu vergleichenden Mode an. Das  $MAC$  nimmt Werte zwischen eins und null an. Bewegt sich der Wert gegen eins, so zeigt das, dass die beiden Eigenvektoren linear zueinander sind. Nimmt das  $MAC$  Werte an, welche gegen null gehen, sind die Vektoren nicht linear zueinander. Werden so alle Eigenvektoren beider Modelle gegenübergestellt, sollte das Ergebnis im besten Falle eine Einheitsmatrix ergeben. Bewegen sich die Werte in der Matrix auch außerhalb der Hauptdiagonalen zwischen eins und null, ist dies ein Indikator für nicht linear zueinander stehende Eigenvektoren. Sollten aber die Werte direkt neben der Hauptdiagonalen Werte nahe eins annehmen, so deutet dies auf Wechselmoden hin. Bei diesen Frequenzen liegen die Frequenzen der Biegemoden nahe an den Frequenzen der Torsionsmoden.

---

<sup>11</sup>Modal Assurance Criterion

### 3 Durchführung

Bevor die eigentlichen Messungen stattfanden, wurden Testläufe durchgeführt, um sich mit der Funktionsweise des 3D-Laser-Scanners vertraut zu machen. So ließen sich die Messdurchgänge besser planen und notwendige Vorbereitungen treffen. Informationen zur Herangehensweise und der Ziele der vorzunehmenden Messungen werden in diesem Kapitel erklärt.

#### 3.1 Versuchsaufbau

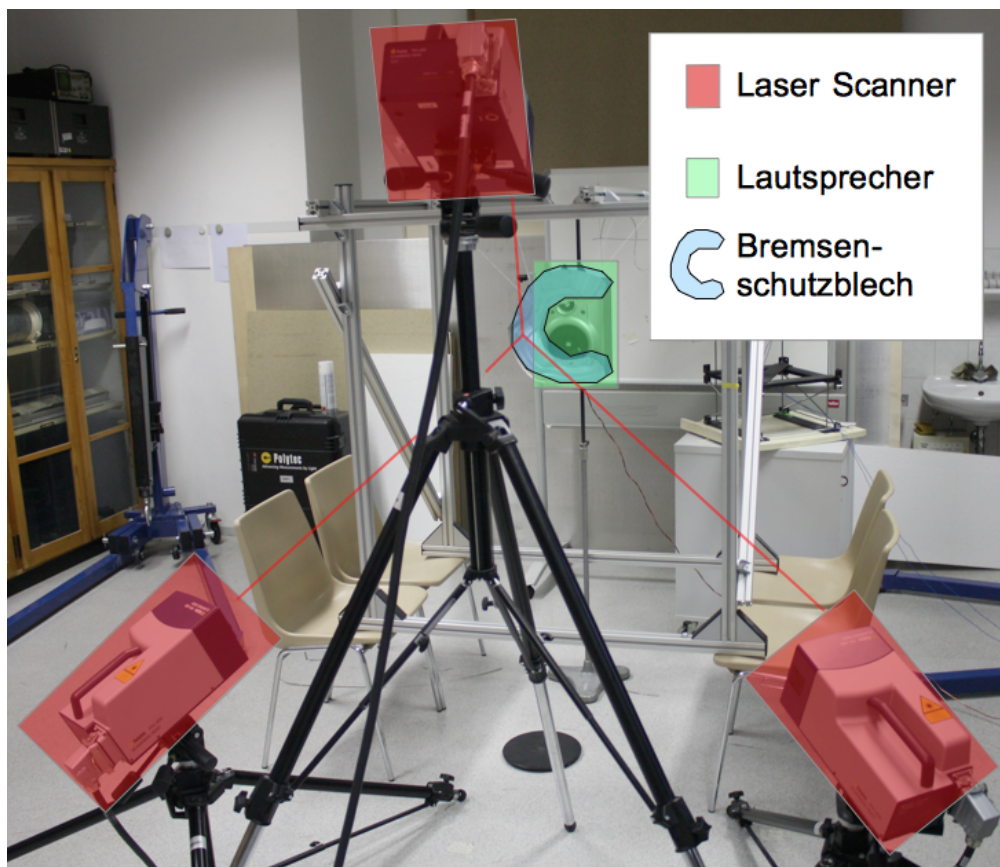


Bild 3.1: Die drei Laser-Scanning-Vibrometer (rot) sind auf das Bremsenschutzblech (blau) im Messstand gerichtet. Dahinter befindet sich ein Lautsprecher (grün) als Erregerquelle.

Durch die experimentelle Modalanalyse sollen die Modalparameter des BSB festgestellt werden. Dazu wird es in einen Rahmen mit Elastanschnüren eingehängt (vgl. Bild 3.1). Die Elastanschnüre dienen der Entkoppelung des BSB von durch den Rahmen übertragenen Schwingungen.



Von der Rückseite wird das BSB mit einem an die Steuereinheit (vgl. Bild 3.2) angeschlossenen Lautsprecher angeregt. Auf den BSB befinden sich von den bisherigen Messungen Reflektorfolienstücke, um an den entsprechend beklebten Punkten die Reflektionseigenschaften des Blechs zu maximieren. Die Fügstellendämpfung zwischen der aufgetragenen Folie und den Blechen besitzt nachweislich einen Einfluss [10]. Da die Reflektionseigenschaften des Blechs für eine flächige Vermessung wie mit dem 3D-Laser-Scanner nicht ausreichen, seine Eigenschaften aber durch weitere Folienstücke nicht weiter beeinträchtigt werden sollen, wird das Blech zusätzlich mit einem Entwicklerspray benebelt. Das Entwicklerspray besitzt keine eigene Oberflächenspannung und hinterlässt, nach dem Verdunsten der Trägerflüssigkeit eine gut reflektierende Staubschicht. Der Einfluss des Entwicklersprays auf das Dämpfungsverhalten der Bleche ist mit dem 3D-Laser nicht messbar, da ohne das Spray nicht die notwendigen Daten gewonnen werden können. Trotz der geringen Gewichtsveränderung (siehe Tabelle 3.1) kann aber der Einfluss des Entwicklersprays auf das Dämpfungsverhalten nicht ausgeschlossen werden. Die Konfiguration des Versuchsaufbaus sowie ein nach dem jetzigen Stand empfehlenswertes Vorgehen sind in Anhang A beschrieben.

Tabelle 3.1: Gewicht der Bremsenschutzbleche ohne und mit Entwicklerspray. Die Bezeichnungen der Bleche mit Buchstaben oder Zahlen wurden unabhängig voneinander vergeben. In dieser Arbeit wird sich auf die Zahlen bezogen.

		Gewicht [g]		Gewichtsveränderung
Blech		unbehandelt	behandelt	[%]
1	CB	160,1	160,4	1,87
2	E	158,5	158,8	1,89
3	CC	159,8	160,1	1,88
4	CE	160,7	161,1	2,49
5	CA	159,7	160,0	1,88



Bild 3.2: Rack mit Computer (oberer Einschub), Signalverarbeitungseinheit (zweiter Einschub von oben) und Steuereinheiten für die drei Laser-Scanner (mittlerer bis unterer Einschub)

### 3.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden hauptsächlich an zwei BSB durchgeführt. In einem ersten Schritt werden die Eigenfrequenzen der BSB festgestellt. Dazu wird das BSB mit einem *Chirp* im erforderlichen Spektrum angeregt. Über die Zuordnung der Amplituden der Eigenfrequenzen zu den Messpunktkoordinaten werden die Eigenformen ermittelt. In einem zweiten Schritt wird das BSB in den ermittelten Eigenfrequenzen angeregt, bis sich ein stationärer Schwingungszustand einstellt. Nach dem Abschalten der Anregung wird das Abklingverhalten jedes Messpunktes aufgezeichnet. Aus der Abklingkurve wird in einem dritten Schritt mit dem Programm LabView der

Dämpfungsgrad ermittelt. Diese drei Parameter werden anschließend mit den in weiteren Messungen und aus dem analytischen Referenzmodell gewonnenen Parametern verglichen.

Die Messköpfe und die Datenerfassungssoftware müssen auf jedes neu eingehängte Messobjekt neu kalibriert werden. Im Laufe dieser Kalibrierung wird dem Messobjekt ein inneres kartesisches Koordinatensystem gegeben. Dieser Vorgang nennt sich 3D-Abgleich (siehe Leitfaden Anhang A). Von diesem aus wird sowohl die Nulllage des Messobjektes als auch die Koordinaten der Messpunkte definiert. Für die Messung der Genauigkeiten wurde der Ursprung des Koordinatensystems nahe Bohrung 3 gewählt (vgl. Bild 3.3). Das Zentrum des Koordinatensystems des FE-Modells befindet sich jedoch im Zentrum des Blechs. Damit beide Koordinatensysteme für einen späteren Abgleich der Messpunkte zusammenpassen, wurden die Koordinaten des Zentrums der Bohrlöcher basierend auf den technischen Zeichnungen der BSB berechnet (vgl. Tabelle 3.2). Um die errechneten Koordinaten den Bohrungen zuweisen zu können, wurden über ihre Mitte schmale Reflektorfolienstreifen mit Markierung (vgl. Bild 3.4) so geklebt, dass die Aufhängung durch die Bohrungen nicht beeinflusst wird. In allen gezeigten Bildern befindet sich daher, sollte es nicht anders angegeben sein, die Z-Achse senkrecht zur Bildebene. X- und Y-Achse werden immer die Bildebene aufspannen.

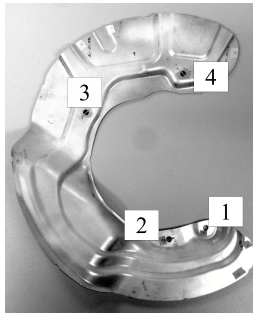


Bild 3.3: Nummerierung der Bohrungen des Bremsenschutzbleches



Bild 3.4: Schmalen Reflektorfolienstreifen mit Markierung durch die Mitte des Bohrlochs

Tabelle 3.2: Koordinaten der Bohrungen bei zentralem Koordinatensystem

Loch	Koordinaten [mm]		
	x	y	z
1	42,7	95,9	0
2	-5,5	104,9	0
3	-91,0	-68,6	0
4	39,6	-103,2	0

### 3.3 Analytisches Referenzmodell

Als Referenz für die durchzuführenden Messreihen dient die zur Verfügung gestellte Modalanalyse des BSBs. Das Blech wurde mit den in Tabelle 3.3 angegebenen Eigenschaften modelliert und frei lagernd, ohne Belastung, mit dem FEM-Programm *Abaqus* berechnet. Einflüsse durch Auflager- und Luftdämpfung wurden vernachlässigt. Die ermittelten Eigenfrequenzen sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst. Die vorgenommenen Messreihen werden sich auf die ersten drei Eigenfrequenzen und -formen beziehen (vgl. Bilder 3.5 - 3.8).

Auf Grundlage der Modalanalyse wird eine FRF generiert. Dafür wird eine Belastung der Größe eins an einem Knoten aufgebracht. Der Knoten wird so ausgewählt, dass er bei keiner der zu betrachtenden Eigenformen in einem Nulldurchgang liegt. Andernfalls würde kein brauchbares Antwortsignal errechnet werden können.

Für den quantitativen Abgleich der Knotenverschiebungen zwischen Simulation und Experiment werden die Geometriekoordinaten der Knoten des FE-Models sowie die an den Knoten auftretenden Verschiebungen exportiert. Diese werden später mit Hilfe eines Python-Scripts<sup>12</sup> mit den Geometriekoordinaten der Messpunkte abgeglichen. So werden die zu den Messpunkten äquivalenten Knoten extrahiert. Die Ergebnisse beider Untersuchungen können damit, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, direkt miteinander verglichen werden.

Tabelle 3.3: Materialwerte des simulierten Bremsenschutzblechs

Material	Aluminium
Dichte	$2,7 \text{ g/cm}^3$
Querdehnzahl	0,35
E-Modul	$70000 \text{ N/mm}^2$
Element	S4R (Shell)
Kantenlänge	1mm

Tabelle 3.4: Numerisch ermittelte Eigenfrequenzen

Eigenfrequenzen [Hz]			
Mode 1-6	0,0 ( <i>Starrkörpermoden</i> )		
Mode 7	45,7		Mode 16 490,3
Mode 8	55,1		Mode 17 511,3
Mode 9	111,5		Mode 18 597,8
Mode 10	136,0		Mode 19 643,8
Mode 11	187,3		Mode 20 704,3
Mode 12	251,9		Mode 21 858,8
Mode 13	291,4		Mode 22 895,0
Mode 14	313,6		Mode 23 947,0
Mode 15	422,7		Mode 24 957,5

<sup>12</sup>pointextract.py

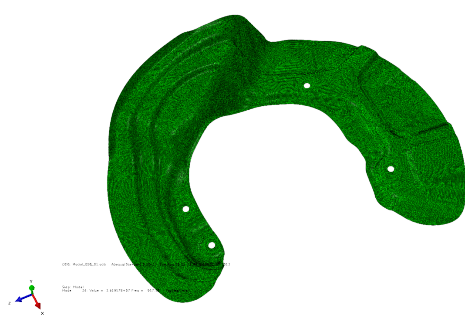


Bild 3.5: Undeformiertes Bremsenschutzblech

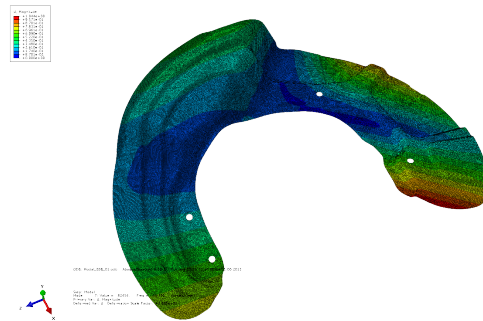


Bild 3.6: Mode 7 bei 44,9 Hz

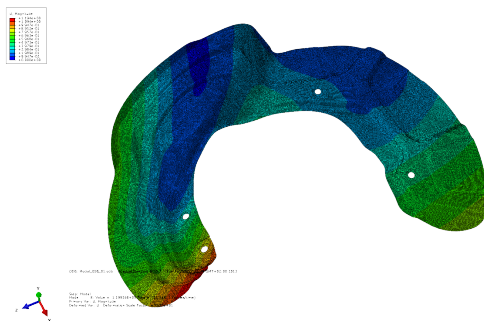


Bild 3.7: Mode 8 bei 53,3 Hz

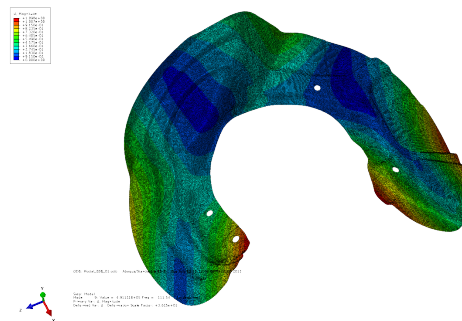


Bild 3.8: Mode 9 bei 110,9 Hz

### 3.4 Datenverarbeitung

Das vorhandene Messsystem der Firma Polytec besitzt neben der Datenerfassungs- auch Auswertungssoftware. Mit dieser erfolgt die direkte Auswertung der gewonnenen Messdaten. Festlegung der Frequenzbänder und Darstellung der zugehörigen Eigenformen ist mit ihr möglich. Von den gewonnenen Messdaten lassen sich Aspekte wie Verschiebung, Geschwindigkeit und Beschleunigung in den Bereichen Amplitude, Real- und Imaginärteil, sowie hinsichtlich der Phase visualisieren und exportieren. In einem Signalprozessor können die gewonnenen Messdaten zudem mit mathematischen Operationen verändert oder durch Aufteilen von dreidimensionalen Informationen in eindimensionale Komponenten zerlegt werden. Die Daten können in unterschiedlicher Form exportiert werden. So besteht neben der in dieser Arbeit verwendeten Möglichkeit, die gewonnenen Daten als ASCII-Datei zu exportieren auch die Schnittstelle zu Modalanalyse-Software wie ME'scope. Die generierten ASCII-Dateien werden mit LabView ausgewertet. Aus den Dateien zu jedem Messpunkt wird der Dämpfungsgrad und die beim Anpassen der  $e$ -Funktion erzeugten Residuen ermittelt. Diese Ergebnisse werden in einer eigenen ASCII-Datei gespeichert ebenso wie die mit Hilfe von Pythonskripten aus der Simulation extrahierten Informationen. Diese Informationen werden miteinander verglichen und abschließend visualisiert.

## 4 Auswertung der Messdaten

Die Messvorgänge dauern, abhängig vom zu messenden Spektrum und der Anzahl der Messpunkte, bis zu einer Stunde. Die gewonnenen Daten für jeden Messpunkt werden nach den im letzten Kapitel erläuterten Kriterien bearbeitet. Wie die bereits vorgestellten Grenzwerte ermittelt werden und welches die Ergebnisse der Messungen sind, wird dieses Kapitel darstellen.

Die Abkürzungen der in diesem Kapitel gezeigten Tabellen sind in Tabelle 4.1 beschrieben. Die Messprotokolle und genauen Einstellungen der einzelnen Messungen sind im Anhang beigefügt. Auf sie wird jeweils konkret verwiesen.

Tabelle 4.1: Bedeutungen der abgekürzten Spaltenbezeichnungen

$\overline{D}$	durchschnittliche Dämpfung
$\sigma(D)$	Standardabweichung der Dämpfung
$\overline{AF}$	durchschnittliche Abweichung der Frequenz
$\overline{OR}$	durchschnittliches oberes Residuum
$\overline{UR}$	durchschnittliches unteres Residuum
Min	Minimum
Max	Maximum
MaxRes	Maximal zugelassenes Residuum

Dargestellt werden die Ergebnisse mit Hilfe von Punktwolken. Jeder Punkt darin spiegelt einen Messpunkt wider. Die Färbung der Punkte zeigt die Werte an den Messpunkten an.

## 4.1 Genauigkeit der Messergebnisse

Die Genauigkeit der Messergebnisse wird überprüft, indem an ein und dem selben Blech der gleiche Messvorgang mehrfach wiederholt wird und die Abweichungen der Ergebnisse einander gegenübergestellt werden. Überprüft wird die Genauigkeit der Daten hinsichtlich:

- der Positionierung der Messpunkte,
- der gemessenen Frequenzen,
- der Dämpfung,
- der Einstellungen der Auswertungssoftware LabView,
- der Aufhängung der BSB.

Messpunkte, welche in einer der Messungen kein hinreichendes Signal zurückwerfen können und deswegen nicht gezählt werden, werden in allen Messungen ausgelassen. Aus allen Messungen eines Punktes wird der Mittelwert sowie seine Standardabweichung gebildet. Wird die Standardabweichung auf den Mittelwert bezogen, so nennt sich dieser Wert Variationskoeffizient. Dieser soll als Bewertungsmaß der einzelnen Untersuchungen dienen. Hinsichtlich der Positionierung wird aus den X-, Y- und Z-Koordinaten die Vektorsumme gebildet und miteinander verglichen. Die gemessenen Frequenzen werden direkt miteinander verglichen. Der Dämpfungsgrad muss erst mit Hilfe des Programms LabView ermittelt werden. Im Anschluss werden die Punkte, bei welchen die Ermittlung des Dämpfungsgrad zu großen Fehlern unterliegt, aussortiert. Als Fehlermaß wird das Residuum der *Curve Fitting* Methode in LabView verwendet. Es zeigt an, wie genau die einhüllende  $e$ -Funktion an die abklingende Schwingung angepasst werden kann (vgl. Kapitel 2.3.2). Als Grenzwert für das Residuum wird der Durchschnitt der Residuen der zu betrachtenden Messungen verwendet. Ist das Residuum größer als der festgelegte Grenzwert, so ist davon auszugehen, dass das Signal, an welches die Einhüllende angepasst wird, verrauscht ist (vgl. Bild 4.1 und 4.2).



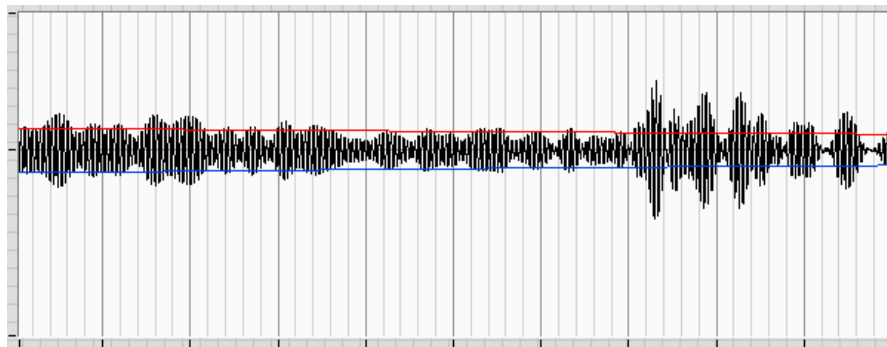


Bild 4.1: Ausschnitt eines schlechten Antwortsignals. Die Einhüllende (blau und rot) passt sich schlecht an das Antwortsignal (schwarz) an. Das Residuum ist größer als der festgelegte Grenzwert. Dieser Messpunkt geht nicht in die Auswertung mit ein.

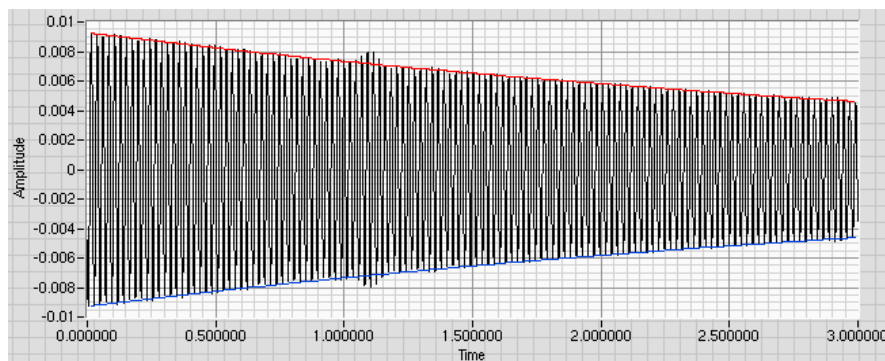


Bild 4.2: Ausschnitt eines klaren Antwortsignals. Die Einhüllenden (blau und rot) passt sich gut an das Antwortsignal (schwarz) an. Das Residuum ist kleiner als der festgelegte Grenzwert. Dieser Messpunkt wird ausgewertet.

Als repräsentativer Wert für die Abweichung der Durchschnittswerte wird der Median gewählt. Der Median stellt den mittleren Wert aller der Größe nach sortierten Werte dar und ist resistent gegen Ausreißer. Der aufgerundete Median soll als Grenzwert für die zu erwartenden Messungenauigkeiten dienen. Die Einstellungen des Messsystems dieses Kapitels mit Ausnahme von 4.1.5 sind in Anhang B.1 beigefügt.

### 4.1.1 Abweichung der Messpunktpositionen

Durch das erneute Einhängen der BSB ändert sich die Distanz zwischen den Messköpfen und der Oberfläche der Bleche. Mit Hilfe des inneren Koordinatensystem des BSBs verändern sich jedoch die Koordinaten der Messpunkte nur im Rahmen der Genauigkeit des 3D-Abgleichs. Von den Koordinaten jedes Messpunktes wird der Mittelwert aller Messungen errechnet. Die Standardabweichung dieser Koordinaten bezogen auf den Mittelwert ergibt den Variationskoeffizienten jedes Messpunkts. Tabelle 4.2 zeigt, dass es große Abweichungen von bis zu 12,54 % geben kann. Dabei handelt es sich aber um Ausreißer, was zum einen vom niedrigen Median belegt wird, als auch in den Bildern 4.3 und 4.4 zu sehen ist. Wie die Bilder auch erkennen lassen, befinden sich die wenigen Ausreißer an Positionen, an welchen aufgrund von plötzlichen geometrischen Veränderungen das Signal nicht gut reflektiert wurde. Dabei handelt es sich entweder um die Kanten des BSB, die Bohrungen oder Messungen auf die Aufhängung der BSB (tiefe Messpunkte in Bildern 4.3 und 4.4). Von diesen Messpunkten wird ein diffuses Signal zurückgeworfen (vgl. Bild 4.5), welches zur Auswertung nicht zu gebrauchen ist. Derartige Messpunkte werden weder für die Genauigkeitsberechnung, noch für die Feststellung des Dämpfungsgrades verwendet.

Tabelle 4.2: Abweichung der Ortsvektoren voneinander

	Variationskoeffizient [%]		
	Blech 1	Blech 2	Resultierend
Min	0.02	0.07	0.02
Median	0.15	0.28	0.24
Max	8.06	12.54	12.54

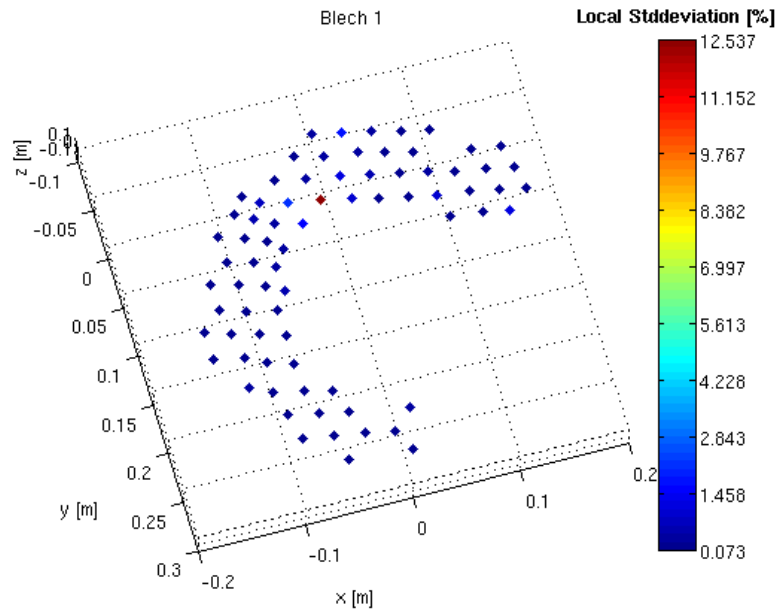


Bild 4.3: Variationskoeffizient der lokalen Abweichung an Blech 1. Es ist ein Ausreißer zu erkennen, welcher sich an Bohrung Nr. 3 (vgl. Bild 3.3) befindet. Bei einer der Messungen hat der Laser nicht das Blech, sondern durch die Bohrung gemessen. Das reflektierte Signal ist dementsprechend unbrauchbar (vgl. Bild 4.5).

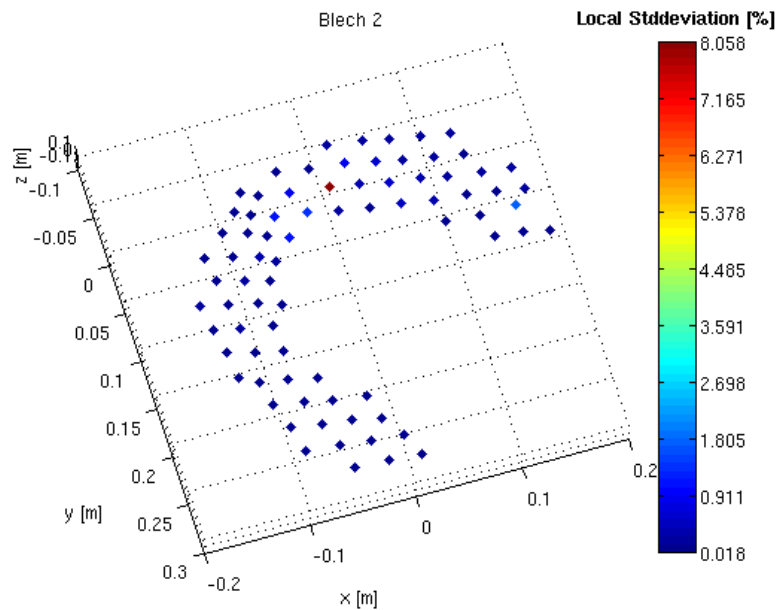


Bild 4.4: Variationskoeffizient der lokalen Abweichung an Blech 2. Es ist ein Ausreißer zu erkennen, welcher sich an Bohrung Nr. 3 (vgl. Bild 3.3) befindet. Bei einer der Messungen hat der Laser nicht das Blech, sondern die Aufhängung des Bleches gemessen. Das reflektierte Signal ist dementsprechend unbrauchbar (vgl. Bild 4.5).

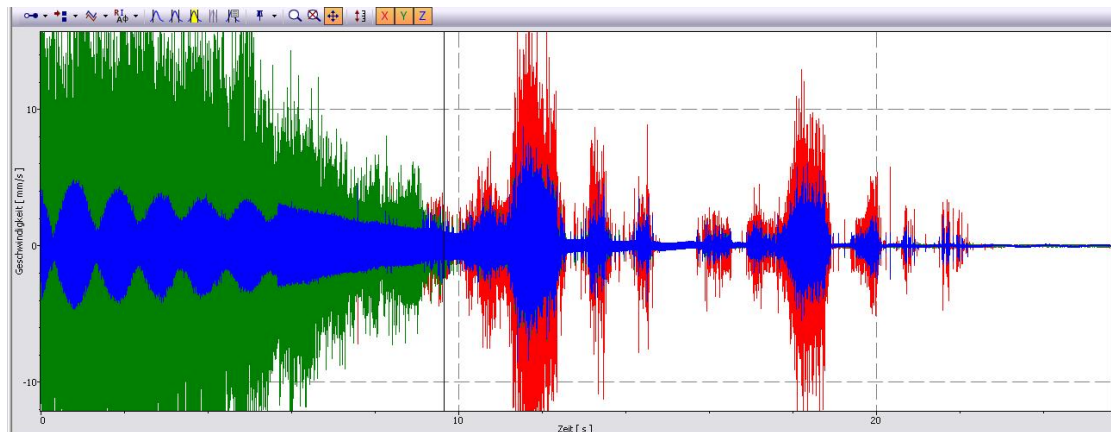


Bild 4.5: Das Fenster der Datenerfassungssoftware von Polytec zeigt ein Antwortsignal im Zeitbereich eines schlecht oder diffus reflektierenden Messpunktes. Blau ist dabei die Amplitude in Z-Richtung, grün jene in Y- und rot die in X-Richtung. Bis zur durchgezogenen Linie wurde dieser Messpunkt angeregt, danach befindet er sich in abklingendem Zustand. Die Artefakte sind auf schlechte Reflektionseigenschaften an Bohrungen, Kanten oder Aufhängung zurückzuführen.

Die Auswertungsergebnisse von Geometriedaten besitzen, wenn gemäß dem im letzten Kapitel beschriebenen Vorgehen aufgerundet wird, eine Messgenauigkeit von 0,3 %. Zwar mag dieser Wert nicht groß sein, doch bedeutet das durch den variablen Abstand der Messköpfe zu den Messobjekten eine Ungenauigkeit von drei Millimeter pro Meter.

#### 4.1.2 Abweichung der Frequenz

Das BSB wird mit dem Lautsprecher von hinten flächig mit einer gleichbleibenden Frequenz angeregt. Es besitzt eine gleichmäßige Dicke und nur an wenigen Stellen starke Wölbungen (vgl. Bilder 1.1, 3.3, 3.4). Die gemessene Frequenz weicht daher trotz der im vorherigen Kapitel beschriebenen geometrischen Ungenauigkeit der Messpunktkoordinaten nur minimal vom Durchschnitt ab (vgl. Tabelle 4.3). Erkennbare Ausreißer in Bild 4.6 befinden sich an Aufhängungspunkten (tiefrot, hellblau) oder an Wölbungen (türkis). Bild 4.7 weist keine markanten Ausreißer auf. Die größte Abweichung hier ist nahe der Kante des BSB zu finden (tiefrot).

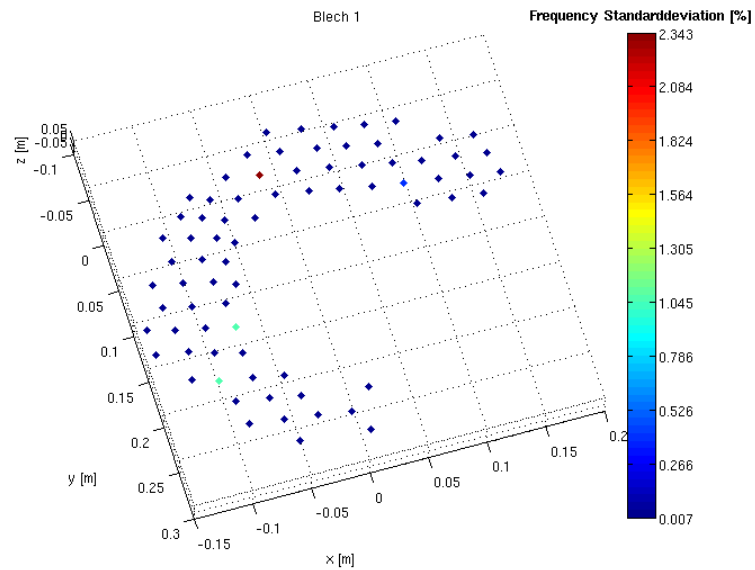


Bild 4.6: Abweichungen der gemessenen Frequenz auf der Oberfläche von Blech 1 in %. Ausreißer befinden sich an den Aufhängepunkten (tiefrot, hellblau) und an starken Steigungen (türkis).

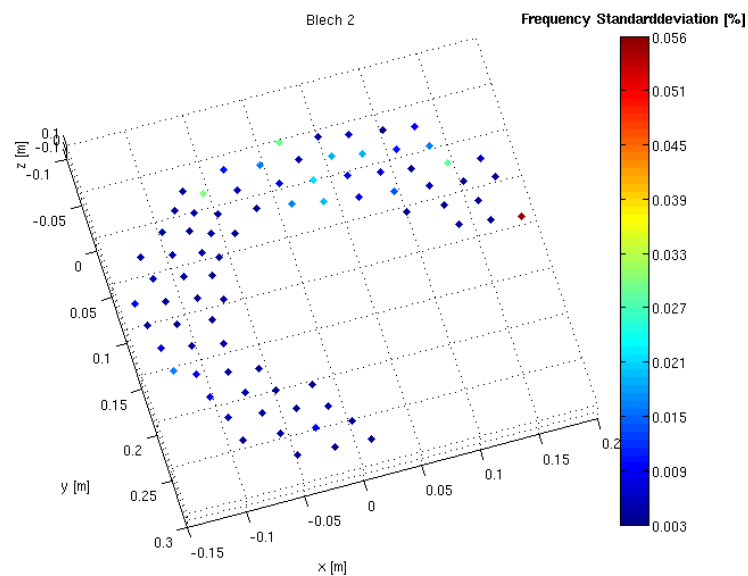


Bild 4.7: Abweichungen der gemessenen Frequenz auf der Oberfläche von Blech 2 in %. Hier sind keine markanten Ausreißer festzustellen. Die größte Abweichung ist an der Kante des BSBs zu finden (tiefrot).

Tabelle 4.3: Variationskoeffizient der gemessenen Frequenz an den einzelnen Messpunkten. Große Abweichungen entstehen an den Kanten oder den Bohrungen (vgl. Bilder 4.6 und 4.7).

	Variationskoeffizient [%]		
	Blech 1	Blech 2	Gesamt
Min	6.81E-003	3.08E-003	3.08E-003
Median	9.45E-003	4.75E-003	8.01E-003
Max	2.34	5.65E-002	2.34

Der niedrige Median von 8,01E-003% zeigt, dass Messungen der Frequenz einer hohen Genauigkeit unterliegen. Werden unterschiedliche Frequenzen an einem Messobjekt festgestellt, so ist dies demnach auf das von der Struktur abhängige Dämpfungs- und Rückstrahlungsverhalten zurückzuführen. Abweichungen zwischen Messungen ein und des selben Messpunktes ab dem Promille-Bereich müssen hier als Ausreißer behandelt werden.

#### 4.1.3 Curvefitting Einstellungen in LabView

Die Auswertung der Dämpfungsmessung erfolgte mit dem Programm LabView. Der Dämpfungsgrad wird durch das Anschmiegen der Funktion  $e^{-\beta t}$  (vgl. Kapitel 2.3.2) an die abklingende Amplitude errechnet. Das zur Verfügung gestellte Programm<sup>13</sup>, welches bisher zur Auswertung der Einpunktmessung verwendet wurde, ist derart modifiziert worden, dass es den Anforderungen der dreidimensionalen Messung genügt<sup>14</sup>. Im Rahmen dieser Überarbeitung wurde auch das Curvefitting-Modul ersetzt. Es stellt drei verschiedene Methoden der Anschmiegung der  $e$ -Funktion zur Verfügung. *Least Squares*, *Bisquares* und *Least Absolute Residuals*. Das neue Modul besitzt u.A. die Möglichkeit, die beim Anschmiegen erzeugten Residuen auszugeben, welche Auskunft über die Genauigkeit des Anschmiegens und die Güte des Signals geben. Diese Möglichkeit besaß das ursprüngliche Modul (fortan "Alte Methode" bezeichnet) nicht. Um zu entscheiden, welche Methode verwendet werden soll, wurden die Daten eines Blechs mit allen vier Varianten ausgewertet und sowohl der erzeugte Fehler (Bild 4.10), als auch der gemessene Dämpfungsgrad (Bild 4.8) verglichen.

<sup>13</sup>Auswertung\_Daempfung\_Clean\_LabView2010.vi

<sup>14</sup>Auswertung\_Daempfung\_Stapelverarbeitung\_LabView2010.vi

Tabelle 4.4: Vergleich der Methoden *Least Squares*, *Bisquare* und *Least Absolute Residuals*

Methode	$\bar{D}$	$\sigma(D)$	$\overline{OR}$	$\overline{UR}$
Least Squares	8.20E-002	4.80E-002	4.75E-009	4.75E-009
Bisquare	8.56E-002	4.07E-002	6.89E-009	6.39E-009
LARes	9.05E-002	3.34E-002	3.04E-005	3.05E-005

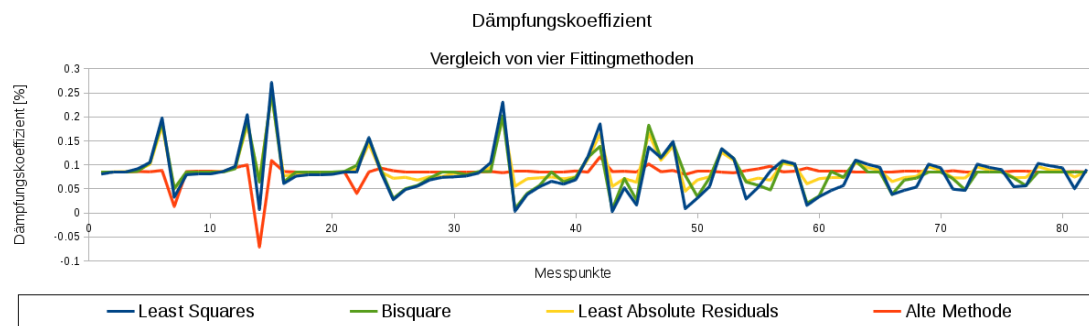


Bild 4.8: Dämpfungsgrad für jeden Messpunkt, abhängig von der Curvefitting Methode

Die in Bild 4.8 dargestellten Unterschiede im Dämpfungsgrad resultieren an der unterschiedlichen Form der Anschmiegung. Diese ist in Bild 4.9 am Ausschnitt des Signals von Punkt 56 dargestellt. Die "Alte Methode" (blau) lässt sich von Ausreißern sehr beeinflussen, während die übrigen Methoden mit unterschiedlichen Rechenalgorithmen versuchen Ausreißer zu interpolieren.

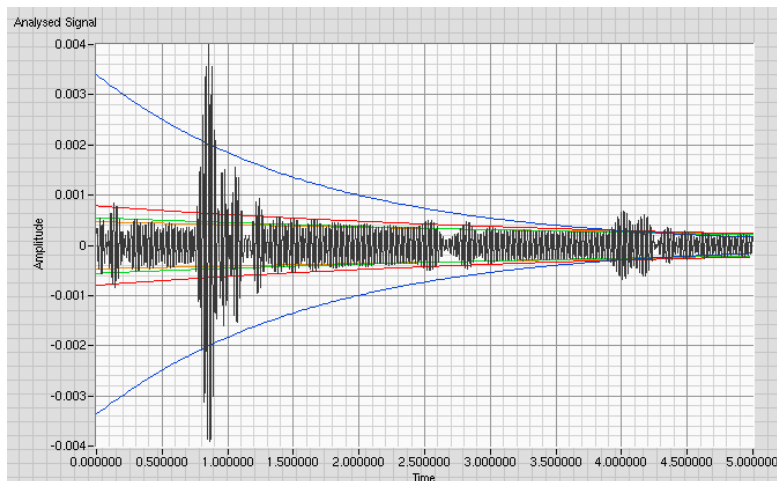


Bild 4.9: Vergleich der einzelnen Fitting Methoden. An das diffuse Signal (schwarz) schmiegen sich die Kurven der *Alten Methode* (blau), der *Least Squares* (rot), der *Absolute Least Residuals* (grün) und der *Bisquare Methode* (orange) an. Punkte mit einem derart schlechten Antwortsignal werden nach den in Kapitel 4.1 festgelegten Kriterien aussortiert und nicht zur Auswertung verwendet.

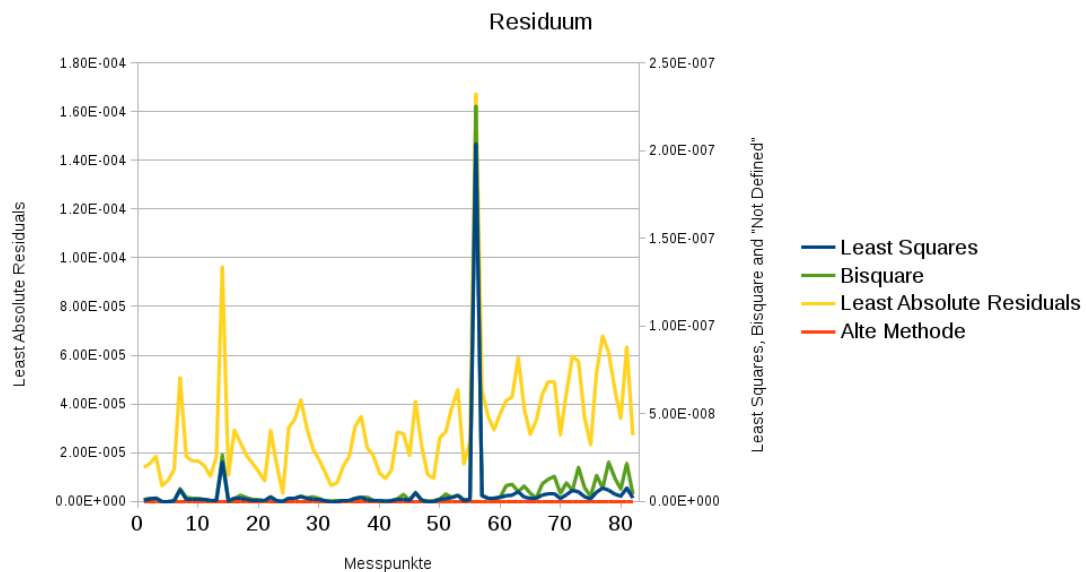


Bild 4.10: Residuen der Curvefitting Methoden beim Anschmieg an die Abklingkurve. "Alte Methode" kann nicht ermittelt werden und ist daher gleich null.



Die *Least Squares* Methode besitzt die größte Standardabweichung für die Dämpfungsgrade (vgl. Bild 4.8), schmiegt sich aber mit dem geringsten Fehler an die Abklingkurve an (vgl. Tabelle 4.4). Bild 4.10 zeigt dies noch einmal anschaulich. Dass die Residuen der "Alten Methode" gleich Null sind liegt daran, dass sie nicht gemessen werden können. Auch ist in Bild 4.8 erkennbar, dass die "Alte Methode" die geringsten Abweichungen um die durchschnittliche Dämpfung besitzt. Da die "Alte Methode" nicht die Möglichkeit bietet, die Residuen der Anschmiegung darzustellen, welche als Gradmesser für die Güte der Messsignale verwendet werden, wird ihr auch keine weitere Beachtung geschenkt. Da die *Least Squares* Methode sich mit dem kleinsten Residuum an die Abklingkurve anschmiegt, ist davon auszugehen, dass mit ihr schlechte Signale am besten identifiziert werden können. Das Residuum der Anschmiegung sollte sich hier am signifikantesten verändern. Daher wird die *Least Squares* Methode zur Auswertung für alle Abklingkurven verwendet.

#### 4.1.4 Abweichung der Dämpfung

Im Unterschied zur Frequenz im vorletzten Abschnitt wird die Dämpfung nicht direkt gemessen. Zwar wird im Frequenzfenster der Auswertungssoftware die 3dB Dämpfung angezeigt, doch lassen sich die Werte dafür weder speichern noch exportieren. Daher wird mit dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Programm<sup>15</sup> der Dämpfungsgrad der Abklingkurve ermittelt. Durch das Aussortieren der Dämpfungswerte, deren Fitting Residuum zu groß ist (vgl. Kapitel 4.1.3), werden auftretende Schwankungen im Vorhinein versucht zu verringern. Damit wird aber auch die Datenmenge, aus welcher sich die Informationen der Dämpfungsabweichung ergeben, schon im Vorhinein beeinflusst.

Tabelle 4.5 zeigt, dass es trotz der Selektion der Daten Punkte mit großer Ungenauigkeit gibt (bis zu 45 % Abweichung). Dabei handelt es sich jedoch um selten auftretende Ereignisse (vgl. Bild 4.12). Der niedrige Median von 3,31 % belegt diese Annahme. Die vorhandenen Ausreißer befinden sich an den Kanten der BSB oder an Stellen mit sich verändernder Höhe. Die Ungenauigkeit der Messpunktkoordinaten führt hier dazu, dass die zurückgeworfenen Signale zwar brauchbar und gültig<sup>16</sup> sind, doch dass die Dämpfungswerte sich wegen der veränderten Oberfläche in nahem Abstand stark verändern. So sind die über die Kontur der Bleche verteilten Abweichungen (Bilder 4.11 und 4.12) an Wölbungen des Blechs zu finden.

<sup>15</sup>Auswertung\_Daempfung\_Stapelverarbeitung\_LabView2010.vi

<sup>16</sup>Ihr Fitting Residuum liegt unterhalb der festgelegten Grenze

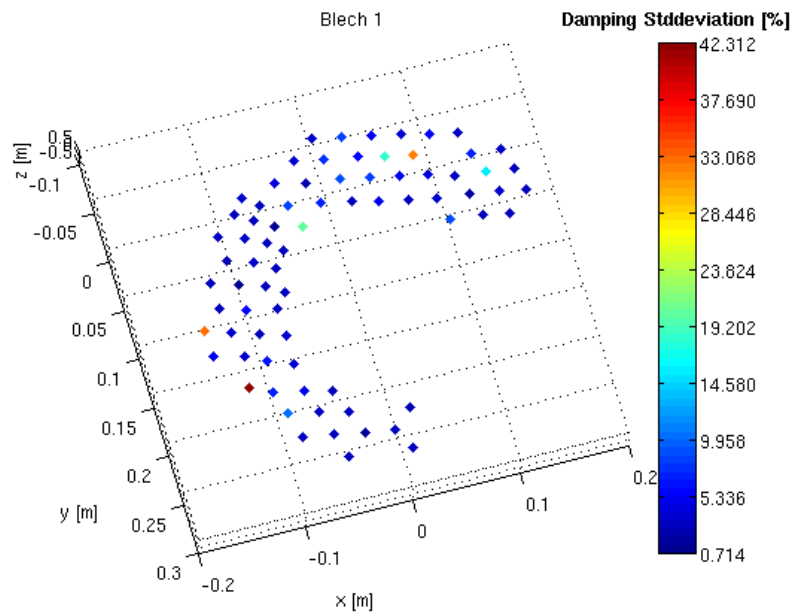


Bild 4.11: Variationskoeffizient der lokalen Dämpfung von Blech 1. Die Abweichungen der Dämpfung sind ungleichmäßig verteilt und mit einem Median von 3,7 % (dunkelblau) gering. Doch auch höhere Abweichungen bis 42,3 % (tiefrot) können auftreten.

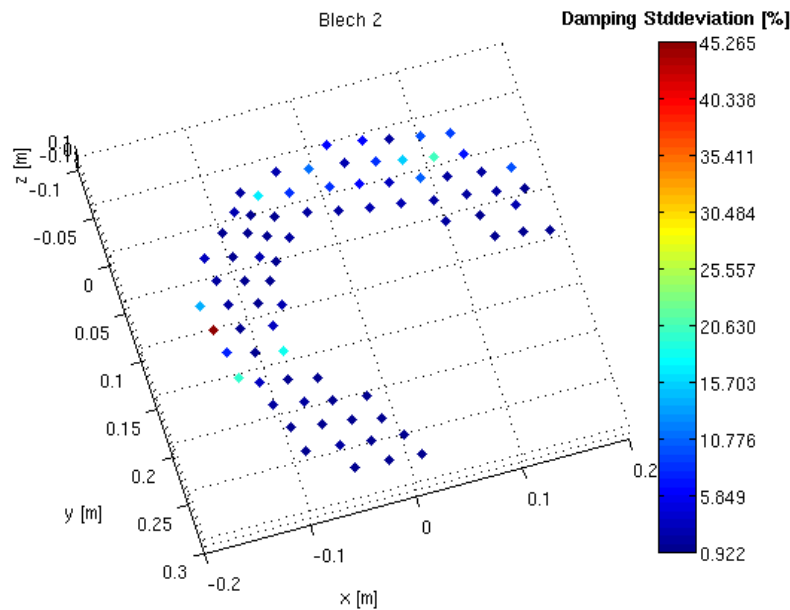


Bild 4.12: Variationskoeffizient der lokalen Dämpfung von Blech 2. Tiefrot ist ein Ausreißer mit starker Abweichung an der Kante des Blechs gekennzeichnet. Hier verändert sich die Oberfläche des Blechs rapide. Andere Abweichungen (türkis) sind an Stellen mit gleicher geometrischer Inkonsistenz zu finden.

Tabelle 4.5: Variationskoeffizient der gemessenen Dämpfung an den einzelnen Messpunkten und maximales Residuum, welches pro Blech festgestellt wurde.

	Variationskoeffizient [%]		
	Blech 1	Blech 2	Gesamt
Min	0.71	0.92	0.71
Median	3.69	4.88	3.31
Max	42.31	45.26	45.26
MaxRes	3.55E-009	2.29E-008	

Die Dämpfungsmessungen besitzen Tabelle 4.5 zu Folge eine Abweichung von 3,31% im Median. Aufgerundet wird von einem Wert von 4% ausgegangen. Die gemessenen Dämpfungswerte werden mit dieser Unsicherheit ausgewertet und dargestellt. Lokale Abweichungen innerhalb dieser Grenze können folglich nicht als tatsächliche Veränderung des Dämpfungsgrades angenommen werden.

#### 4.1.5 Einfluss der Messsystemkonfiguration

Im Rahmen der Genauigkeitsmessung wurden zwei verschiedene Methoden verwendet, um die Messpunkte zu definieren. *Methode 1* steht dafür, zwar das BSB vor jeder Messung aus dem Versuchsstand auszuhängen und es danach wieder einzusetzen, doch nach dem 3D-Abgleich für jede Messung gleichbleibende Einstellungen zu verwenden. *Methode 2* steht dafür, das Blech nicht nur aus- und wieder einzuhängen, sondern auch die Einstellungen der Messpunkte neu zu setzen. Die neuen Einstellungen wurden mit den gleichen Parametern wie Messgitterdichte, -Art und -Kontur erstellt. Dadurch ändern sich nicht nur von Messung zu Messung die Koordinaten der Messpunkte, auch die Indizierung kann sich anders über das Messobjekt erstrecken. Bevor die Messpunkte miteinander verglichen werden können, müsste ihr Indizierung derart angepasst werden, dass Punkte mit gleichen Indizes die kürzesten Abstände voneinander besitzen. In diesem Fall wurde darauf geachtet, dass auch bei abweichenden Koordinaten die Indizierung der Messpunkte einander möglichst gleicht, um vergleichbare Messergebnisse zu generieren. Betrachtet wurde auch hier der Unterschied in der Dämpfung an ein und dem selben Blech, gemessen mit den eben erläuterten Methoden. Ziel dieses Vergleiches ist es, festzustellen, ob die Einstellungsdateien mit den Messprotokollen gespeichert werden sollten, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Die Standardabweichung beider Methoden hat die gleiche Größenordnung, die zweite Methode erzielt aber etwas schlechtere Ergebnisse (vgl. Tabelle 4.6).

Tabelle 4.6: Bei *Methode 1* wurde das Blech mit den identischen Einstellungen vermessen. Bei *Methode 2* wurden für jede Messung die Einstellungen von Grund auf neu eingerichtet.

	Variationskoeffizient [%]	
	Methode 1	Methode 2
Min	0.71	0.27
Median	3.69	6.20
Max	42.31	43.28

Sollen die Messergebnisse an anderer Stelle exakt wiedererbracht werden, so ist es also im Rahmen der in Kapitel 4.1.4 erläuterten Ungenauigkeit unumgänglich, die exakten Einstellungen zur Vermessung des Messobjektes zu verwenden. Ist das Ziel aber die qualitative Reproduktion der Ergebnisse, ist die Datei mit den gespeicherten Einstellungen nicht notwendig.

## 4.2 Messung der Eigenfrequenzen

Bevor eine Dämpfungsmessung mit dem Abklingversuch stattfinden kann, müssen die Eigenfrequenzen des BSB ermittelt werden. Da es sich beim Laser-Scanning um ein Verfahren mit vielen Messpunkten handelt, ist es einfacher, die Eigenfrequenzen mit Hilfe eines *Chirps* zu ermitteln, als mit einem Rauschen. Die Phase des Signals ist dabei eindeutiger zuzuweisen. Bild 4.13 zeigt die Amplituden für das BSB in einem Messbereich bis 500 Hz. Deutlich erkennbar sind die Amplituden nahe den aus der Simulation ermittelten Eigenfrequenzen (vgl. Kapitel 3.3).

Als Folgerung aus Abschnitt 4.1.5 werden, um möglichst geringe Abweichungen zu generieren, fortan für zu vergleichende Messungen die gleichen Einstellungen verwendet. Durch den 3D-Abgleich werden so die Messpunkte an nahezu der selben Position auf dem BSB platziert. Messpunkte, welche wegen schlechter Signalqualität in einer der zu vergleichenden Messungen nicht auftreten, werden auch in der anderen Messung nicht beachtet.

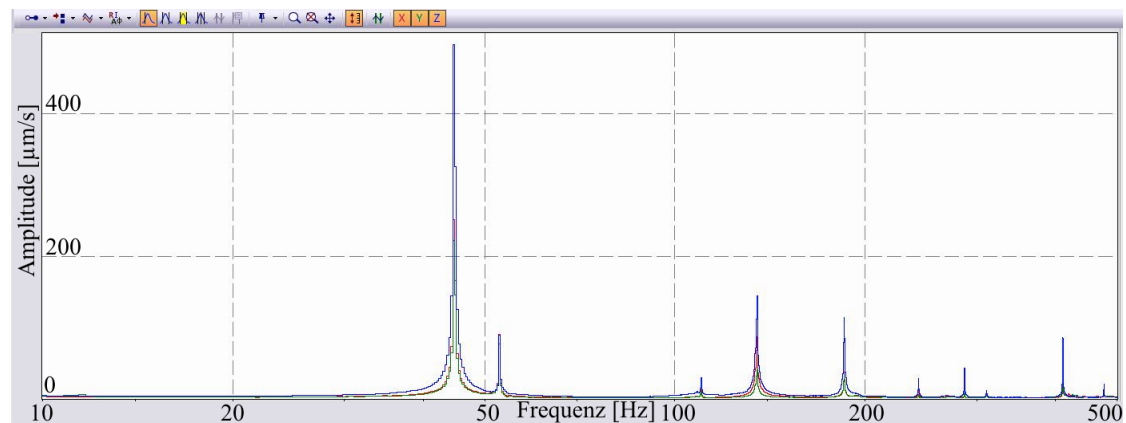


Bild 4.13: Amplituden der Modalanalyse des BSB im Messbereich bis 500 Hz. Große Amplituden sind an den Eigenfrequenzen zu erkennen. Rot ist die Amplitude der Geschwindigkeiten in X-Richtung, grün jene in Y- und blau die in Z-Richtung.

#### 4.2.1 Vergleich der Eigenfrequenzen

Die in Bild 4.13 gezeigten Amplituden sind der Durchschnitt aller Messpunkte. In der Datenerfassungssoftware werden die Frequenzen an der Spitze der Amplitude in Hauptausschwingrichtung<sup>17</sup> festgestellt und daraus ein Frequenzband über alle Eigenfrequenzen im Messbereich erstellt. Die siebte bis 16. gemessene Eigenfrequenz der fünf zur Verfügung gestellten Bleche sind in der Tabelle 4.7 dargestellt.

Tabelle 4.8: Vergleich der gemessenen Eigenfrequenzen zwischen 3D-, 1D-Laser und FE-Simulation

Mode	Ermittelte Eigenfrequenzen [Hz]			Abweichung [%]		
	3D Laser	1D Laser	FE	3D zu 1D	3D zu FE	1D zu FE
7	44.8	44.3	45.7	1.14	1.99	3.16
8	53.1	52.9	55.1	0.39	3.76	4.16
9	110.5	110.3	111.5	0.19	0.90	1.09
10	135.1	134.8	136.0	0.25	0.64	0.89
11	185.3	184.3	187.3	0.54	1.08	1.63
12	242.4	240.0	251.9	0.98	3.93	4.96
13	284.4	285.0	291.4	0.21	2.46	2.25
14	312.3	311.8	313.6	0.14	0.43	0.58
15	410.9	408.8	422.7	0.50	2.88	3.40
16	476.3	497.8	490.3	4.52	2.95	1.51

<sup>17</sup>In dieser Arbeit immer die Z-Richtung

Tabelle 4.7: Eigenfrequenzen der Bleche 1 bis 5. Blech 1, 3, 4 und 5 stammen aus einer Charge, Blech 2 aus einer zweiten. Das ist auch deutlich erkennbar an den unterschiedlichen Eigenfrequenzen. Die letzte Spalte DAD zeigt die durchschnittliche Abweichung der gemessenen (Blech 1-5) zur simulierten (FE) Eigenfrequenz.

Mode Nr.	Eigenfrequenz [Hz]						$\overline{AF}$
	Blech 1	Blech 2	Blech 3	Blech 4	Blech 5	FE	[%]
7	45.41	43.46	44.84	44.92	45.41	45.7	2.02
8	53.22	52.25	53.13	53.71	53.22	55.1	3.76
9	111.33	108.89	110.16	111.33	110.84	111.5	0.90
10	135.74	134.28	135.16	135.25	135.25	136	0.64
11	185.55	184.08	185.31	186.04	185.55	187.3	1.08
12	243.16	239.75	243.13	243.16	242.68	251.9	3.93
13	287.11	276.86	287.19	284.18	286.62	291.4	2.48
14	313.48	311.04	311.25	311.52	313.96	313.6	0.48
15	411.13	408.69	410.78	413.09	410.64	422.7	2.88
16	477.05	473.63	477.03	477.54	476.07	490.3	2.95
Einstellungen	Anh. B.2	Anh. B.3	Anh. B.4	Anh. B.5	Anh. B.6	Tab. 3.4	

Wegen der in Abschnitt 4.1.2 festgestellten hohen Genauigkeit der Messergebnisse von Frequenzen sind die Abweichungen der einzelnen Bleche untereinander nicht der Messungenauigkeit zuzuschreiben. So ist erkennbar, dass auch in der selben Charge Unterschiede hinsichtlich der Eigenfrequenzen herrschen. In der zweiten Charge sind Eigenfrequenzen zu erkennen, welche trotz gleicher Herstellungsweise von der ersten Charge deutlich abweichen. Ob und in welchem Rahmen die Eigenfrequenzen unterschiedlicher Chargen um die selben Werte tendieren, konnte in dieser Arbeit nicht festgestellt werden.

#### 4.2.2 Vergleich der Eigenformen

Der Vergleich der Eigenformen zwischen Messung und Simulation kann nur qualitativ erfolgen, da in FE-Programmen die Ergebnisse der Verschiebung normiert werden<sup>18</sup>. Für einen ersten Abgleich werden die Bilder der gemessenen neben die der simulierten Moden gelegt. Um genaueren Aufschluss zu erhalten, werden in einem zweiten Abgleich die maximalen und minimalen Werte der Verschiebung und der Geschwindigkeit verglichen. Es handelt sich zwar bei den Simulationsergebnissen um Verschiebungen und bei den Messergebnissen um Geschwindigkeiten, doch da die Geschwindigkeit die zeitliche Ableitung der Verschiebung darstellt, sind beide proportional zueinander.

<sup>18</sup>In die Gleichung  $(\lambda_0^2 \mathbf{M} + \mathbf{K})\hat{\mathbf{u}}_0 = 0$  (2.3) die ermittelten Eigenwerte  $\lambda$  eingesetzt.  $\hat{\mathbf{u}}$  kann damit beliebige Werte annehmen.

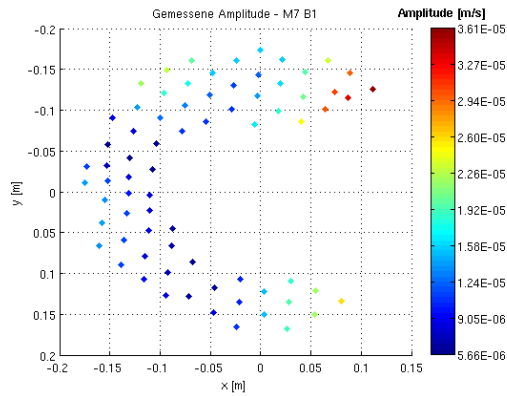


Bild 4.14: Gemessener Mode 7. In den roten Bereichen herrscht die höchste Geschwindigkeit, in den blauen die niedrigste.

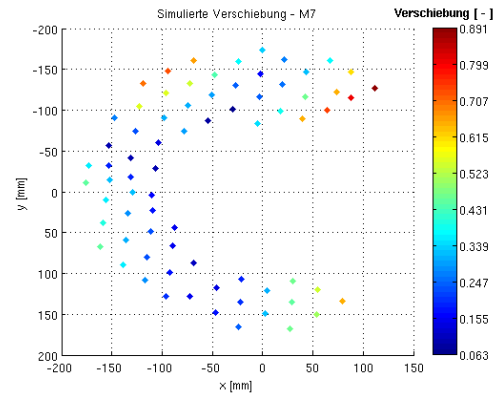


Bild 4.15: Simulierter Mode 7. In den blauen Bereichen herrscht die niedrigste Auslenkung, in den roten die höchste.

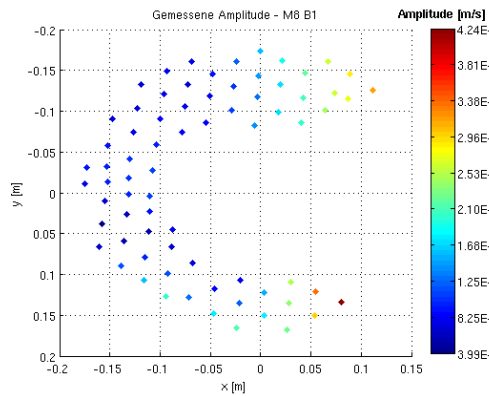


Bild 4.16: Gemessener Mode 8. In den roten Bereichen herrscht die höchste Geschwindigkeit, in den blauen die niedrigste.

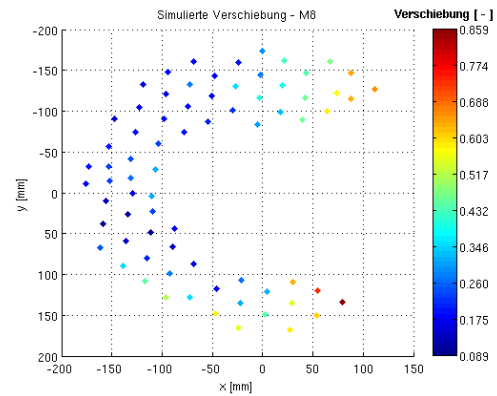


Bild 4.17: Simulierter Mode 8. In den blauen Bereichen herrscht die niedrigste Auslenkung, in den roten die höchste.

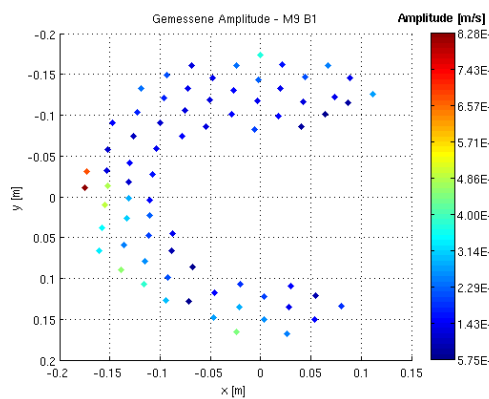


Bild 4.18: Gemessener Mode 9. In den roten Bereichen herrscht die höchste Geschwindigkeit, in den blauen die niedrigste.

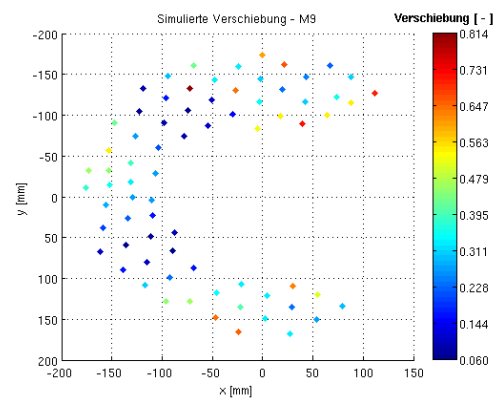


Bild 4.19: Simulierter Mode 9. In den blauen Bereichen herrscht die niedrigste Auslenkung, in den roten die höchste.

Im Gegensatz zu den Moden sieben (Bilder 4.14 und 4.15) und acht (Bilder 4.16 und 4.17) ist erkennbar, dass bei der neunten Mode Messung (Bild 4.18) und Simulation (Bild 4.19) nicht gut zusammenpassen. Während die obere Flanke der Messung keine Amplituden aufzeigt (blau), befinden sich bei der simulierten Mode an den selben Stellen große Amplituden (rot). Tabelle 4.9 belegt diesen Eindruck mit Zahlen. Sowohl zur größten als auch zur kleinsten Amplitude der Messung wurden die korrespondierenden Knotenverschiebungen der Simulation herausgesucht und ins Verhältnis gesetzt. Sind die Verhältnisse von Eigenform sieben und acht etwa ähnlich, so divergiert das Verhältnis bei Eigenform neun sehr. Die X-, Y- und Z- Komponenten sowie Bilder der Moden aus Messung und Simulation sind in Anhang C beigelegt.

Tabelle 4.9: Verhältnis der maximalen zur minimalen Amplitude [m/s] der Messung und Verschiebung [-] der Simulation

	Mode 7		Mode 8		Mode 9	
	Messung	Simulation	Messung	Simulation	Messung	Simulation
Min	5.66E-006	9.64E-002	3.99E-005	8.94E-002	5.75E-006	1.67E-001
Max	3.61E-005	8.91E-001	4.24E-004	8.59E-001	8.28E-005	3.78E-001
Max/Min	6.38	9.24	10.63	9.61	14.40	2.26

Das Mode 7 und Mode 8 linear zueinander zu sein scheinen, belegt auch das *MAC* der beiden Eigenformen (vgl. Tabelle 4.10). Das *MAC* von Mode 9 hingegen deutet jedoch darauf hin, dass hier keine Linearität zwischen Messung und Simulation besteht. Die *MAC*-Matrix bestätigt den Eindruck, der beim Vergleich der X-, Y- und Z- Komponenten der Moden (vgl. Anhang C) entsteht. Der Vergleich der gemessenen Mode 8 mit der simulierten Mode 9 lässt auf einen Wechselmode, also einen Torsionsmode nahe an einem Biegemode schließen. In diesem Fall werden die Ergebnisse direkt neben der Hauptdiagonalen auch nahezu eins. Dafür müsste aber auch der Vergleich von simulierter Mode 8 zu gemessener Mode 9 ein vergleichbares Ergebnis liefern. Dies ist nicht der Fall. Es sind also möglicherweise die Ergebnisse der Messung der neunten Mode fehlerhaft. Ursache dafür kann die Art der Aufhängung sein, welche für diesen Mode nicht vergleichend überprüft wurde.



Tabelle 4.10: MAC der Moden 7, 8 und 9. Das nahe an eins liegende MAC der Moden 7 und 8 deutet auf Linearität der Messung zur Simulation hin, das MAC des Modes 9 hingegen nicht.

MAC	gemessen Mode 7	gemessen Mode 8	gemessen Mode 9
simuliert Mode 7	0.96	0.77	0.57
simuliert Mode 8	0.85	0.98	0.51
simuliert Mode 9	0.72	0.74	0.57

#### 4.2.3 Vergleich der Amplituden

Um feststellen zu können, ob Parallelen zwischen dem richtungsbezogenen Dämpfungsgrad und den richtungsbezogenen Amplituden bestehen, wurden die Amplituden des Abklingvorgangs extrahiert und untersucht. Wie Tabelle 4.11 zeigt, sind die Amplituden in X- und Y- Richtung, also senkrecht zur Anregerichtung etwa gleich groß (vgl. Bild 4.20). Der Median des Verhältnisses aller Amplituden der X- zur Y- Richtung beträgt hier 1,10. Das Verhältnis der X- zu Z- Amplituden beträgt sowohl im Minimum, als auch im Median und Maximum etwa die Hälfte des Verhältnisses X zu Y. Die Amplituden in Anregerichtung sind also doppelt so groß wie Orthogonalen dazu (vgl. Bild 4.21).

Tabelle 4.11: Verhältnis der Amplituden in X-, Y- und Z-Richtung

	Abklingamplituden [m/s]			Verhältnis	
	x	y	z	x/y	x/z
min	8.92E-005	7.54E-005	1.59E-004	0.07	0.02
med	1.20E-003	1.30E-003	2.80E-003	1.10	0.57
max	4.68E-003	4.44E-003	9.66E-003	25.64	12.21

Es lässt sich damit festhalten, dass das Blech an jeder Stelle doppelt so schnell in die angeregte Richtung (Z) schwingt, wie in den Richtungen orthogonal zur Anregerichtung (X und Y). In weiterführenden Untersuchungen sollte die Frage geklärt werden, ob diese Beobachtung tatsächlich mit der Anregungsrichtung zusammenhängt, oder ob sie auf das Verhältnis der Dimensionen zueinander zurückgeführt werden kann.

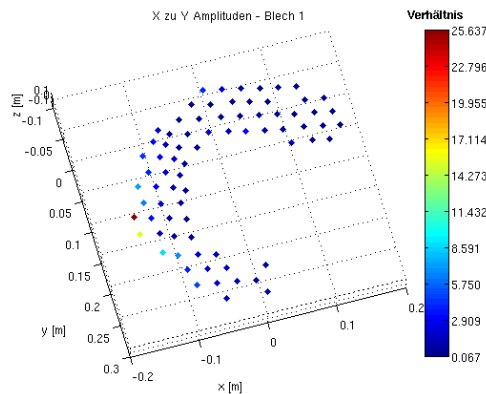


Bild 4.20: Verhältnis der X- zu den Y- Amplituden. Mit wenigen Ausnahmen beträgt es auf dem gesamten BSB 1,1 (vgl. Tabelle 4.11).

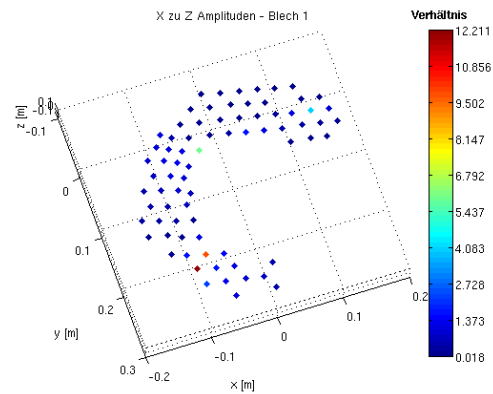


Bild 4.21: Verhältnis der X- zu den Z- Amplituden. Mit wenigen Ausnahmen an starken Steigungen des Blechs beträgt das Verhältnis auf dem gesamten BSB 0,57 (vgl. Tabelle 4.11).

### 4.3 Dämpfungsgrad

Die Dämpfung wurde an Blech 1 und Blech 2 für die ersten drei Eigenfrequenzen gemessen. Damit soll ein Eindruck gewonnen werden, wie sich der Dämpfungsgrad pro Messpunkt über zunehmende Frequenzen hinweg verhält. Zudem wurde der Einfluss der Aufhängung an zwei verschiedenen Aufhängungsarten sowie die Komponenten der Dämpfung in alle drei Raumrichtungen gemessen. Die Einstellungen der Messungen sind zu finden in Anhang B.1, B.7 und B.8.

#### 4.3.1 Einfluss der Aufhängung

Die Bleche werden "U"-förmig und "abnehmend" aufgehängt. Bei der "abnehmenden" Aufhängung (vgl. Bild 4.22) wird die Aufhängung in den Bohrungen 3 und 4 vorgenommen, bei der "U"- Aufhängung (vgl. Bild 4.23) wird das Blech in den Bohrungen 4 und 1 aufgehängt (vgl. Bild 3.3). Für die "abnehmende" Aufhängung wurde sich entschieden, da sie die einfachste Form der Aufhängung darstellt und mehr als die Hälfte des Bleches frei schwingen lässt. Die "U" Aufhängung schränkt speziell Mode 7 am meisten ein, da die Aufhängung an den Punkten mit der größten Auslenkung erfolgt und diese damit hemmt. Der Einfluss der Aufhängung wurde für die siebte und achte Eigenfrequenz ermittelt.

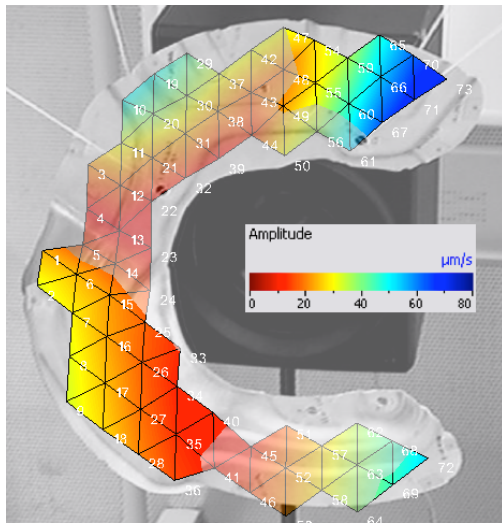


Bild 4.22: abnehmende Aufhängung des BSB. Zu sehen ist das BSB in seiner Aufhängung, überlagert von den Messpunkten und den Amplituden der siebten Eigenform.

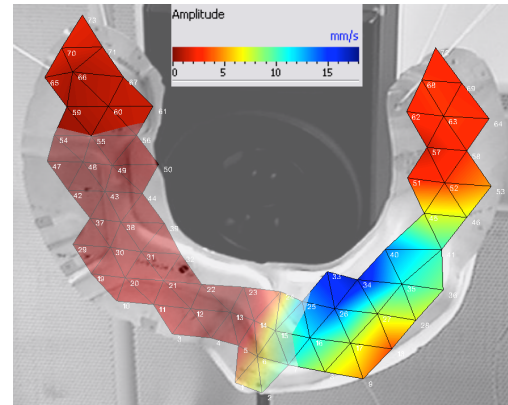


Bild 4.23: "U" -förmige Aufhängung des BSB. Das BSB in seiner Aufhängung ist überlagert von den Messpunkten und den Amplituden der siebten Eigenform.

Wie den Bildern 4.22 und 4.23 entnommen werden kann, hat die Aufhängung eine sichtbare Auswirkung auf die Amplituden. Beide Bilder zeigen das Blech bei der Anregung mit der siebten Eigenfrequenz (45,41Hz). Während bei der "abnehmenden" Aufhängung jedoch die Enden des Blechs die größten Amplituden aufzeigen (blau) und sich durch die Mitte ein Areal ohne Amplitude zieht (rot), ist bei der "U" -förmigen Aufhängung gerade das Gegenteil der Fall. Wie erwartet schwingen die Enden des Blechs nicht (rot), dafür besitzt es an der Wölbung in der Mitte eine große Amplitude (blau). Wie die Tabellen 4.12 und 4.13 zeigen, hat die Aufhängung auch eine Auswirkung auf das Dämpfungsverhalten. In jeder Richtung besitzt die "U" -förmige Aufhängung einen wenigstens 4% größeren Dämpfungsgrad als die "abnehmende" Aufhängung. Dieses Verhältnis ist in Tabelle 4.14 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 4.12: Verhältnis des Dämpfungsgrades [%] der siebten Eigenfrequenz in X-, Y- und Z-Richtung

	x		y		z	
	abnehmend	U	abnehmend	U	abnehmend	U
Min	0.072	0.013	0.078	0.051	0.084	0.006
Median	0.085	0.088	0.085	0.090	0.085	0.089
Max	0.090	0.233	0.101	0.183	0.086	0.123
Verhältnis	1.037		1.054		1.046	

Tabelle 4.13: Verhältnis des Dämpfungsgrades [%] der achten Eigenfrequenz in X-, Y- und Z-Richtung

	x		y		z	
	abnehmend	U	abnehmend	U	abnehmend	U
Min	0.091	0.067	0.079	0.095	0.023	0.077
Median	0.120	0.110	0.120	0.110	0.120	0.109
Max	0.232	0.184	0.227	0.128	0.130	0.121
Verhältnis	1.094		1.095		1.099	

Tabelle 4.14: Verhältnis des Dämpfungsgrades der "abnehmenden" zur "U"-förmigen Aufhängung

Median	Mode 7	Mode 8
"abnehmend"	0.085	0.120
"U"-förmig	0.089	0.109
Verhältnis	1.047	1.099

### 4.3.2 Dämpfung von Blech 1

Die Dämpfung, als aussagekräftiger Parameter über den Verschleiß von Bauteilen unter Schwingungsbeanspruchung kann nun mit den in den vorigen Kapiteln getroffenen Einschränkungen bewertet werden. In Kapitel 4.1.4 wurde als Grenzwert für die Genauigkeit der Dämpfungsmessung 4% festgelegt. Die in "abnehmender" Aufhängung gemessene und mit der *Least Squares* Methode ermittelte Dämpfung wird nun in in allen drei Raumrichtungen einander gegenübergestellt. Die Darstellung des siebten Modes bezieht sich noch auf den Koordinatenursprung bei Loch 3, die Darstellung der Moden acht und neun verwendet ein zentrales Koordinatensystem.

Das Bild 4.24 zeigt die gemessene Verteilung der Dämpfung in X-Richtung. Erkennbar ist, dass sich verschiedene Dämpfungswerte über das gesamte Blech verteilen. Wird dieses Bild nun mit der 4%igen Toleranz, welche in Kapitel 4.1.4 festgelegt wurde, bereinigt, so ist das Ergebnis Bild 4.25. Erkennbar ist eine homogene Verteilung des gleichen Dämpfungskoeffizienten von 0.087 %. Tabelle 4.15 zeigt die rauschbereinigten Dämpfungskoeffizienten in alle drei Raumrichtungen für die gemessenen Moden 7, 8 und 9. Die einzelnen Komponenten der Dämpfung der drei Moden, sowohl gemessen als auch rauschbereinigt, sind in Anhang D beigelegt.

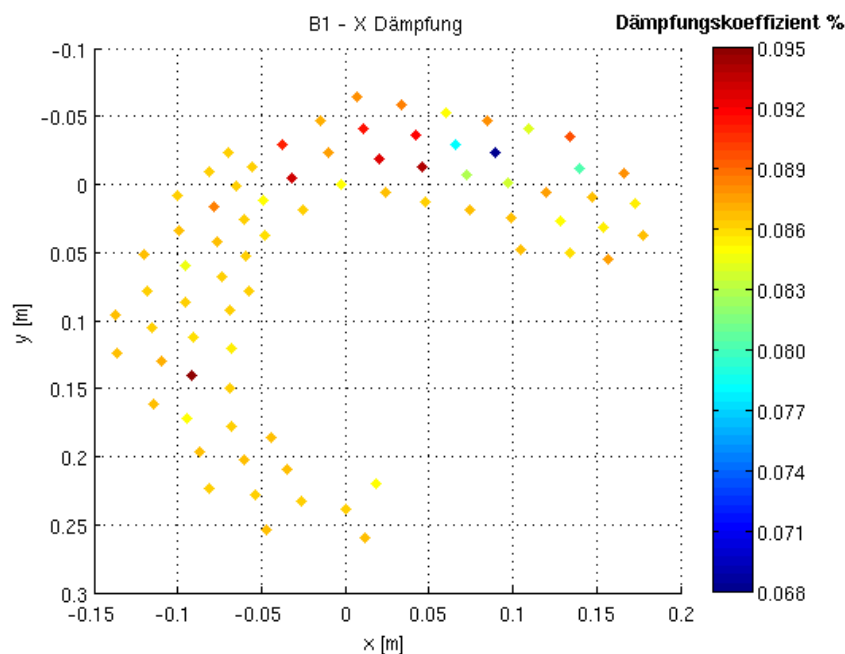


Bild 4.24: X-Richtung der Dämpfung von Blech 1 bei 43,5 Hz (Mode 7).

Die Angleichung der gemessenen Dämpfung durch die Toleranzschwelle von 4% zeigt deutlich, dass die Dämpfung an allen ebenen Stellen des Bleches gleich ist. Veränderungen treten an Stellen mit Wölbungen und Steigungen auf (Bild 4.25 tiefrot, rot, grün und blau). Vergleichbares lässt sich für alle Richtungskomponenten der Moden (vgl. Anhang D) feststellen. Da die Signale im Vorhinein entsprechend ihrer Fitting-Residuen gefiltert werden sind die Dämpfungswerte zuverlässig. Der Dämpfungsgrad ist somit von der Struktur der näheren Umgebung des Messpunktes abhängig.

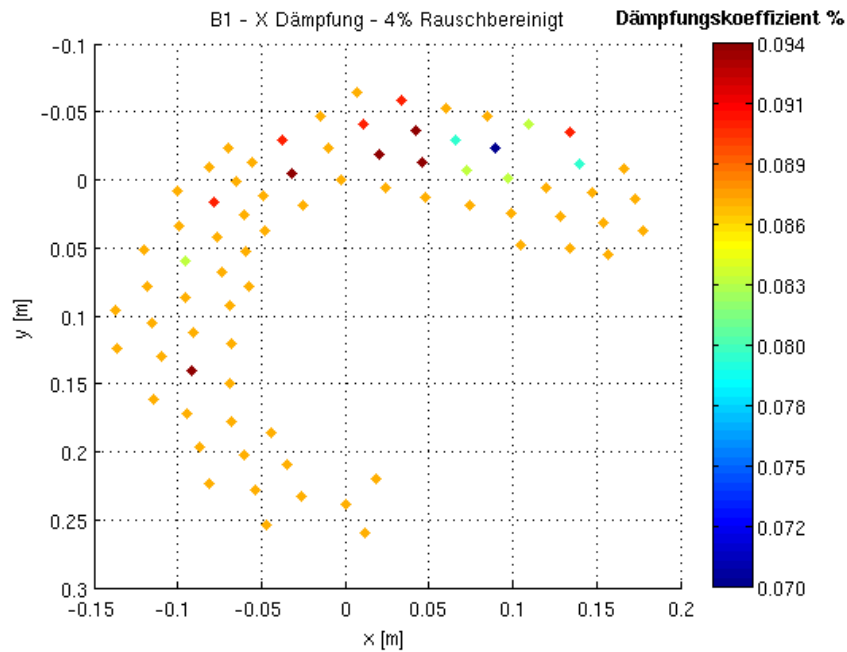


Bild 4.25: X-Richtung der Dämpfung von Blech 1 bei 43,5 Hz (Mode 7) mit 4% Rauschbereinigung.

Tabelle 4.16 vergleicht die Ergebnisse der 3D Messung mit jenen der 1D Messung [10]. Die 1D Messung fand senkrecht zum Blech statt, weswegen sie mit der Z-Richtung der 3D Messung verglichen wird. Es ist davon auszugehen, dass Abweichungen in der Linearität der 1D Messung zur Z-Achse der 3D Messung in der Messgenauigkeit liegen. Die Abweichung der Messergebnisse liegt im Bereich von 1,2% für Mode 7, bei Mode 8 aber schon bei 6,5%.

Damit ist also davon auszugehen, dass für den siebten Mode das Ergebnis der 1D zur 3D Messung im Rahmen der Messgenauigkeit identisch ist, das Ergebnis des achten Modes aber mindestens um 2,5% voneinander abweicht. Anschaulich dargestellt ist dies für die Z-Richtung im Graph in Bild 4.26.

Tabelle 4.15: 4 % rauschbereinigter Dämpfungsgrad für die Moden 7, 8 und 9

[%]	Mode 7			Mode 8			Mode 9		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Min	0.070	0.081	0.084	0.056	0.068	0.047	0.039	0.020	0.055
Median	0.087	0.088	0.088	0.112	0.109	0.111	0.085	0.085	0.089
Max	0.094	0.116	0.109	0.134	0.532	0.153	0.243	0.114	0.099

Tabelle 4.16: Vergleich der Dämpfungswerte der 1D und der 3D Messungen

[%]	1D	3D			Abweichung Z1D zu Z3D
	Z-Richtung	X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung	
Mode 7	0.087	0.087	0.088	0.088	1.19
Mode 8	0.103	0.112	0.109	0.111	6.45
Mode 9		0.085	0.085	0.089	
Mode 11	0.083				

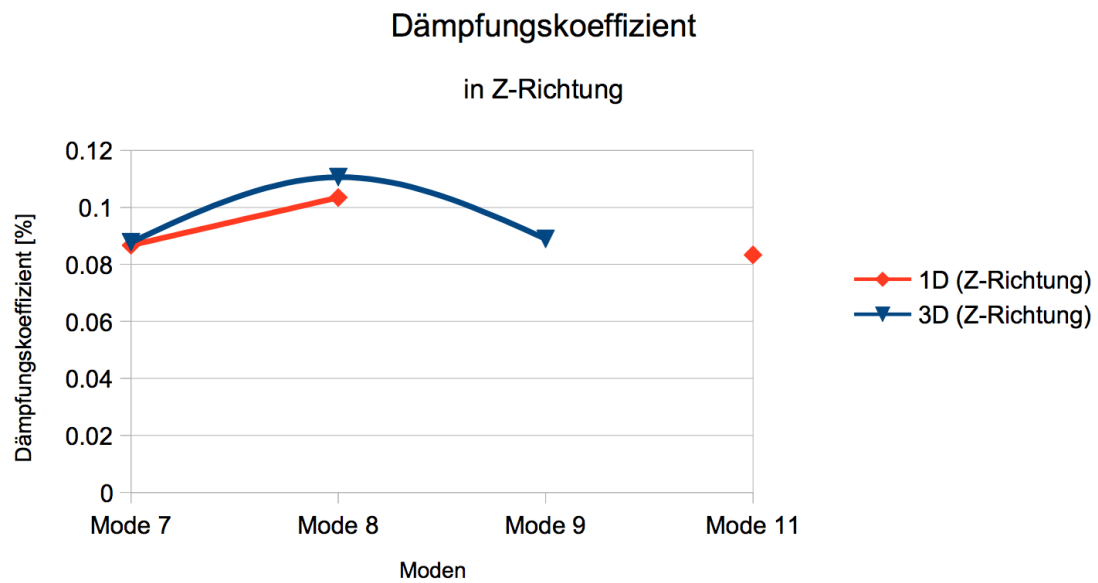


Bild 4.26: Vergleich der Dämpfungswerte der 1D und 3D Messung.

## 5 Ergebnisbewertung

Das im Gegensatz zur eindimensionalen Messung wesentlich aufwändigere 3D-Messverfahren bietet unterschiedliche Vor- und Nachteile. Abschließend sollen hier die Ergebnisse sowie mögliche Fehlerquellen noch einmal zusammengefasst werden und noch offene Fragestellungen definiert werden.

### 5.1 Kritische Betrachtung der Ergebnisse

Da auf keinen aktiven Erfahrungsschatz im Umgang mit dem *PSV-400-3D* zurückgegriffen werden konnte, verbesserten sich die Messergebnisse mit zunehmender Erfahrung. Ist zu Beginn noch ein freies Koordinatensystem gewählt worden, da zwischen FE-Modell und physischem Modell markante Abgleichpunkte fehlten, wurde in den folgenden Schritten mit Behelfsmarkierungen über den Bohrlöchern das Koordinatensystem angeglichen. Diese Art der Markierung ist zwar weit exakter als die erste Variante mit beliebigem Koordinatensystem, doch bleiben Unsicherheiten bei der Anbringung der Reflektorfolie nicht ausgeschlossen. Somit unterliegt der Vergleich zwischen verschiedenen Blechen, selbst wenn identische Messsystemeinstellungen verwendet werden, geometrischen Abweichungen bis in den Millimeterbereich. Ungenauigkeiten in der gemessenen Dämpfung der Punkte sind, wie in Kapitel 4.1.4 die Folge. Die relative Messunsicherheit des Dämpfungsgrads von 4 % sollte, bei verbesserten Varianten der Einmessung, durchaus auf 1 % zu senken sein.

Ein in dieser Arbeit nicht betrachteter Punkt ist der Einfluss des Anregungspunktes. Es wurde versucht, durch die Positionierung des Lautsprechers in angemessenem Abstand hinter dem Messobjekt, das gesamte Messobjekt gleichmäßig anzuregen. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Anregung ausschließlich von der Lautsprechermembran ausgeht. Wie jedoch in anderen Versuchen mit dem selben Lautsprecher festgestellt wurde<sup>19</sup>, ist die Anregung durch die vordere Resonanzkörperöffnung weitaus stärker. Es ist davon auszugehen, dass die Anregung von dieser Öffnung her Phasenverschoben zur Anregung der Membran stattfindet. Inwieweit diese gleichzeitige Anregung und aktive Dämpfung des Messobjekts sich auf das Messverhalten auswirkt, wurde nicht untersucht. Abweichungen hinsichtlich der gemessenen Eigenfrequenzen und dadurch inexakte Anregung zur Dämpfungsmessung sind vorstellbar. Abweichungen der aus den Amplituden der einzelnen Messpunkte zusammengesetzten Eigenformen (vgl. Kapitel

---

<sup>19</sup>Untersuchungen zur Wärmeemission dynamisch beanspruchter Bauteile, 11.-12.03.2015 in München



4.2.2 Mode 9) können eine mögliche Ursache sein. Auf die Dämpfungsermittlung selbst hat dieser Effekt jedoch keine Auswirkung, da die Abklingkurve erst aufgenommen werden kann, sobald der Lautsprecher ausgeschaltet ist.

## 5.2 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das 3D-Laser-Scanning als Verfahren gerade für komplexere Strukturen besser geeignet ist als die eindimensionale Messung. Die Ergebnisse der Eigenfrequenzen können über die gesamte Struktur gesammelt und dargestellt werden und es ist nicht notwendig, in Voruntersuchungen die Positionen der maximalen Auslenkung zu ermitteln und diese auf der Struktur zu markieren. Zumal, abhängig von der Wahl der Hilfsmittel, die Markierung der Regionen des Messobjekt mehr (Reflektorfolie) oder weniger (Entwicklerspray) beeinflussen kann.

Die Ergebnisse im Vergleich zur Simulation sind, bezogen auf die siebte und achte Mode, durchaus vergleichbar (vgl. Kapitel 4.2.2). Das MAC beträgt für diese Moden 0,96 und 0,98.

Bezüglich der Amplituden in den drei Raumrichtungen lässt sich aussagen, dass bei flachen Strukturen wie dem untersuchten BSB die Geschwindigkeit in Anregungsrichtung doppelt so hoch ist wie senkrecht zu ihr (vgl. Kapitel 4.2.3). Weitere Untersuchungen sollten angestellt werden, um zu verifizieren, wie sich das Verhältnis der Amplituden verändert, wenn die Strukturen nicht flächig sondern von einer Kante her angeregt werden oder sich das Verhältnis der Dimensionen der Struktur verändert.

Die Dämpfung ist jedoch, im Gegensatz zu den Amplituden, in allen drei Raumrichtungen nahezu gleich groß (vgl. Kapitel 4.3.2). Bezogen auf die Dämpfung des achten Modes gibt es Abweichungen zwischen der 1D und 3D Messung, die wenigstens 2,5 %, maximal 6,5 % betragen. Trotz der Messgenauigkeit von 4% kann aber mit dem 3D-Laser-Scanner eine ortsabhängige Dämpfung festgestellt werden. Sie tritt an Wölbungen des BSB auf. An ebenen Stellen besitzt das BSB im Rahmen der Messgenauigkeit über die gesamte Struktur hinweg den gleichen Dämpfungsgrad. Es lässt sich daraus schließen, dass der Dämpfungsgrad mit der Struktur der näheren Umgebung des Messpunktes zusammenhängt. So lässt sich bei sich verändernder Struktur ein höherer Dämpfungsgrad feststellen als bei ebener Fläche.

### 5.3 Ausblick

Das in dieser Arbeit verwendete BSB besitzt mit seinen Wölbungen eine komplexere Struktur als jene in den bisherigen Arbeiten verwendeten Aluminiumstreifen. In weiteren Arbeiten sollte jedoch überprüft werden, ab welchem Grad der Strukturierung einer Oberfläche das 3D-Laser-Scanning nicht mehr verwendet werden kann. Einfluss haben darauf sowohl die Abstrahlungswinkel der Oberfläche als auch die Reflektionseigenschaften des unbehandelten Messobjekts.

Die Frage, ob die Messgitterdichte bei Strukturen wie dem Bremsenschutzblech eine Auswirkung auf das Messergebnis hat, wurde bisher noch nicht versucht zu klären. Durch ein verengtes Messgitter verlängert sich zwar die Dauer des Messvorgangs (derzeit etwa 1h), doch könnten durch enger beieinander liegenden Messpunkten Ausreißer aufgrund der sich verändernden Oberfläche konkreter identifiziert werden. Notwendig hierfür ist wiederum eine akkurate und sorgfältige Vorbehandlung der BSB, bei welcher ggf. die derzeit angebrachten Reflektorfolienstücke entfernt werden und die Bleche nach gründlicher Reinigung noch einmal so dicht wie nötig mit Entwicklerspray benebelt werden könnten.

Da durch das dreidimensionale Messverfahren die relative Bewegung der Messpunkte im Raum zueinander bekannt ist, kann auch die Oberflächenspannung untersucht werden. Vergleichende Untersuchungen mit herkömmlichen Methoden sollten Aufschluss darüber geben, ob das 3D-Laser-Scanning dafür geeignet ist.

Bisher noch nicht in den Fokus gerückt sind vergleichende Untersuchungen bezüglich des Energieverlustes durch akustische Anregung. Es ist wohl die Energie bekannt, welche an den zur Anregung genutzten Lautsprecher gesendet wird und auch, welche Energie auf der Oberfläche des Messobjektes gemessen wird. Doch bis jetzt ist es noch nicht unmittelbar möglich zu klären, welcher Teil der Energiedifferenz zwischen Anregung des Lautsprechers und Messung auf der Objektoberfläche durch die Dämpfung des Objekts dissipiert wurde und welcher durch die Streuung des Lautsprechers verloren geht. Die akustische Anregung hat sich als optimal herausgestellt, da sie gezielt steuerbar und reproduzierbar ist, mit wenig Aufwand geleistet werden kann und das Messobjekt nicht zusätzlich beeinflusst. Mit den noch fehlenden Informationen um den Verlust der abgestrahlten Energie, können exaktere Werte für den Dämpfungsgrad ermittelt werden.

Als letzter Punkt sei das *MAC* angesprochen. Gerade weil der gemessene neunte Mode nicht

linear zum simulierten neunten Mode zu sein scheint, wäre es von Interesse, die *MAC*-Analyse über die nächsten Moden weiter fortzusetzen. Damit kann festgestellt werden, ob es sich, wie in Kapitel 4.2.2 erwähnt, um Wechselmoden handelt oder ob bei der Messung Fehler (z.B. durch den Einfluss der Aufhängung) aufgetreten sind.

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Bremsenschutzblech aus Aluminium . . . . .	8
2.1	Vorgehen für Systemanalyse und Systemidentifikation . . . . .	9
2.2	Aufbau des Laser-Doppler-Vibrometers der Firma Polytec [2] . . . . .	20
2.3	Fouriertransformiertes Signal . . . . .	23
2.4	Gedämpfte Schwingung mit angeschmiegener Dämpfungskurve . . . . .	25
3.1	Messstand mit eingehängtem Bremsenschutzblech . . . . .	28
3.2	Steuereinheit für den PSV-400-3D . . . . .	30
3.3	Nummerierung der Bohrungen des Bremsenschutzbleches . . . . .	31
3.4	Schmaler Reflektorfolienstreifen mit Markierung durch die Mitte des Bohrlochs . . . . .	31
3.5	Undeformiertes Bremsenschutzblech . . . . .	33
3.6	Mode 7 bei 44,9 Hz . . . . .	33
3.7	Mode 8 bei 53,3 Hz . . . . .	33
3.8	Mode 9 bei 110,9 Hz . . . . .	33
4.1	Curvefittingausschnitt eines Messpunktes mit schlechtem Signal . . . . .	37
4.2	Curvefittingausschnitt eines Messpunktes mit gutem Signal . . . . .	37
4.3	Lokale Abweichung an Blech 1 . . . . .	39
4.4	Lokale Abweichung an Blech 2 . . . . .	39
4.5	Schlechtes Antwortsignal . . . . .	40
4.6	Abweichungen in der Frequenz an Blech 1 . . . . .	41
4.7	Abweichungen in der Frequenz an Blech 2 . . . . .	41
4.8	Vergleich der Dämpfungsgrade pro Messpunkt . . . . .	43
4.9	Vergleich der einzelnen Fittingmethoden . . . . .	44
4.10	Obere Residuen . . . . .	44
4.11	Abweichungen der lokalen Dämpfung von Blech 1 . . . . .	46
4.12	Abweichungen der lokalen Dämpfung von Blech 2 . . . . .	46
4.13	Amplituden der Modalanalyse des BSB im Messbereich bis 500 Hz . . . . .	49
4.14	Gemessener Mode 7 . . . . .	51
4.15	Simulierter Mode 7 . . . . .	51
4.16	Gemessener Mode 8 . . . . .	51
4.17	Simulierter Mode 8 . . . . .	51
4.18	Gemessener Mode 9 . . . . .	51
4.19	Simulierter Mode 9 . . . . .	51
4.20	Verhältnis der X- zu den Y- Amplituden . . . . .	54
4.21	Verhältnis der X- zu den Z- Amplituden . . . . .	54
4.22	”abnehmende” Aufhängung des BSB . . . . .	55
4.23	”U” -förmige Aufhängung des BSB . . . . .	55
4.24	X-Richtung der Dämpfung von Blech 1 bei 43,5 Hz (Mode 7). . . . .	57
4.25	X-Richtung der Dämpfung von Blech 1 bei 43,5 Hz (Mode 7) mit 4% Rausch- bereinigung. . . . .	58
4.26	Vergleich der Dämpfungswerte der 1D und 3D Messung . . . . .	59

## Tabellenverzeichnis

3.1	Gewicht der Bremsenschutzbleche ohne und mit Entwicklerspray. Die Bezeichnungen der Bleche mit Buchstaben oder Zahlen wurden unabhängig voneinander vergeben. In dieser Arbeit wird sich auf die Zahlen bezogen. . . . .	29
3.2	Koordinaten der Bohrungen bei zentralem Koordinatensystem . . . . .	31
3.3	Materialwerte des simulierten Bremsenschutzblechs . . . . .	32
3.4	Numerisch ermittelte Eigenfrequenzen . . . . .	32
4.1	Bedeutungen der abgekürzten Spaltenbezeichnungen . . . . .	35
4.2	Abweichung der Ortsvektoren voneinander . . . . .	38
4.3	Abweichung der gemessenen Frequenzen beider Bleche . . . . .	42
4.4	Vergleich der Methoden <i>Least Squares</i> , <i>Bisquare</i> und <i>Least Absolute Residuals</i> . . . . .	43
4.5	Abweichung der gemessenen Dämpfung beider Bleche . . . . .	47
4.6	Unterschiede der Messkonfiguration . . . . .	48
4.8	Vergleich der gemessenen Eigenfrequenzen zwischen 3D-, 1D-Laser und FE-Simulation . . . . .	49
4.7	Eigenfrequenzen der Bleche 1 bis 5. Blech 1, 3, 4 und 5 stammen aus einer Charge, Blech 2 aus einer zweiten. Das ist auch deutlich erkennbar an den unterschiedlichen Eigenfrequenzen. Die letzte Spalte DAD zeigt die durchschnittliche Abweichung der gemessenen (Blech 1-5) zur simulierten (FE) Eigenfrequenz. . . . .	50
4.9	Verhältnis von Messung zu Simulation . . . . .	52
4.10	MAC der Moden 7, 8 und 9 . . . . .	53
4.11	Verhältnis der Amplituden in X-, Y- und Z-Richtung . . . . .	53
4.12	Verhältnis des Dämpfungsgrades [%] der siebten Eigenfrequenz in X-, Y- und Z- Richtung . . . . .	56
4.13	Verhältnis des Dämpfungsgrades [%] der achten Eigenfrequenz in X-, Y- und Z-Richtung . . . . .	56
4.14	Dämpfungsgrad bei unterschiedlicher Aufhängung . . . . .	56
4.15	4 % rauschbereinigter Dämpfungsgrad für die Moden 7, 8 und 9 . . . . .	58
4.16	Vergleich der Dämpfungswerte der 1D und der 3D Messungen . . . . .	59

## Literatur

- [1] *PSV-500-3D Scanning Vibrometer*. Polytec GmbH, Polytec-Platz 1-7, 76337 Waldborn, 1st edition, Dezember 2012.
- [2] <http://www.polytec.com/de/loesungen/schwingungen-messen/grundlagen-der-vibrometrie/>. 29. Dezember 2014.
- [3] Randall J. Allemang. The modal assurance criterion - twenty years of use and abuse. *Sound and Vibration*, 2003.
- [4] David John Ewins. *Modal testing: theory, practice, and application*, volume 10. Research Studies Press, Baldock, Hertfordshire, England, 2nd edition, 2000.
- [5] P Hariharan. *Basics of interferometry*. Elsevier Academic Press, Amsterdam, 2nd edition, 2007.
- [6] Normenausschuss Kunststoffe im DIN. *Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften*. Deutschen Institut für Normung e.V., August 2011.
- [7] Hans Günther Natke. *Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen und Modalanalyse: Identifikation schwingungsfähiger elastomechanischer Systeme*. Friedr. Vieweg, 3rd edition, 1992.
- [8] Felix Oberstuke. *Einfluss der Luftdämpfung auf dynamisch angeregte Bauteile*. Bauhaus-Universität Weimar, Institut für Strukturmechanik (ISM), Marienstraße 13, 99423 Weimar, September 2014.
- [9] VDI Ausschuss Werkstoff und Bauteildämpfung. *Werkstoff- und Bauteildämpfung*. Beuth Verlag GmbH, August 2004.
- [10] Christin Zacharias. *Untersuchungen zum Einfluss der Luftdämpfung auf dynamisch angeregte Aluminiumbauteile*. Bauhaus-Universität Weimar, Institut für Strukturmechanik (ISM), Marienstraße 13, 99423 Weimar, 2015.

---

# Anhang

## A Leitfaden zum Arbeiten mit dem PSV-3D-400

### Modalanalyse und Dämpfungsermittlung mit dem PSV-400-3D

Dies ist ein Leitfaden für den Aufbau und die Einrichtung des Messstandes sowie die Messung und Aufarbeitung der gewonnenen Messdaten. Zusätzlich wird dringend empfohlen, sich mit dem Softwarehandbuch der Messvorrichtung vertraut zu machen. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Anleitung besaß der Messaufbau folgende Komponenten:

Laservibrometer	PSV-400
Geometrie Scan Einheit	PSV-A-420
Vibrometercontroller	OFV-5000
Steuereinheit	PSV-400-3D
Betriebssystem	Windows XP Professional
Mess- und Analysesoftwarepaket	PSV 9.0
Endstufe	DPA 4 - 700 Pro Amplifier
Lautsprecher	Sharp, 6 Ohm, 40-80 Watt

### 1 Einrichtung des Prüfstandes

**Der Prüfstand** sollte so viele Umwelteinflüsse wie möglich auf das Messobjekt abschirmen. Es ist darauf zu achten, dass das Messobjekt durch seine Aufhängung entkoppelt, dennoch aber einfach auszuwechseln ist. Um Verdrehungen des Messobjektes zu vermeiden, ist es an wenigstens zwei Stellen frei gelagert aufzuhängen. Damit die Dämpfung der Aufhängung möglichst wenig Einfluss auf das Messobjekt ausübt, sind die Ankerpunkte des Rahmens weit genug voneinander entfernt zu wählen. Bisherige Messreihen ergaben für Elastanfäden die günstigste Entkopplung von Prüfstand und Umgebung. Abhängig von Dimension und Gewicht des Messobjektes sind entsprechende Durchmesser zu wählen.

**Die Messköpfe** sind derart aufzubauen, dass sie ein gleichseitiges Dreieck bilden. Dies ist notwendig, damit die Strahlen nicht parallel verlaufen und klare dreidimensionale Informationen gewonnen werden können. Dabei ist darauf zu achten, dass alle Messpunkte auf der Objektoberfläche von jedem Messkopf aus erreicht werden können. Je nach Reflektionseigenschaften des Messobjekts soll der Einfallswinkel  $20^\circ$  bei schlechten Reflektionseigenschaften, maximal  $40^\circ$  bei guten Reflektionseigenschaften nicht überschreiten. Weitere Informationen zur Behandlung des Messobjekts finden Sie im nächsten Kapitel. Weitere wichtige Informationen zur Einrichtung der Scanköpfe sind im Kapitel 4.6 des Softwarehandbuchs des PSV-400 zu finden.

**Der Lautsprecher** ist auf der den Messköpfen abgewandten Seite des Messobjektes aufzustellen. Er sollte gerade so weit vom Objekt entfernt stehen, dass er das gesamte Objekt gleichermaßen anregt, nicht aber zu weit entfernt, um wirkungslos zu werden. Der Eingang der zugehörigen Endstufe ist an den Generatoranschluss der Steuereinheit anzuschließen und mit Hilfe eines T-Switches mit dem Referenz Eingang 1 zu verbinden.



## 2 Umgang mit dem Messobjekt

Das Messobjekt benötigt gute Reflektionseigenschaften. Besitzt es diese nicht, so ist eine Nachbehandlung zwingend erforderlich. Speziell für die zur Kalibrierung notwendigen Punkte ist nahezu vollständig zurückgestrahltes Licht wichtig. Dafür gibt es Reflektionsfolien, welche auf die entsprechenden Punkte geklebt werden sollten.

- Es ist ratsam, die Folienstücke mit Markierungen zu versehen, um beim Abgleich oder bei der Markierung bekannter Koordinaten eindeutige Positionen zu kennzeichnen (vgl. Abbildung 1, markiertes Folienstück neben Bohrung).

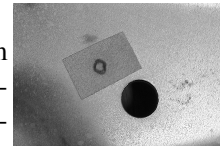


Abbildung 1

- Gerade bei leichten und dünnen Strukturen ist durch das Aufbringen der Reflektionsfolienstücke eine Beeinflussung der Modaleigenschaften zu erwarten.

Reichen die Reflektionseigenschaften des Messobjekts selbst nicht aus, so sollte es mit einem Entwicklerspray<sup>1</sup> flächig besprüht werden.

- Vor dem Sprühvorgang Sicherheitshinweise und Gebrauchsanweisung des Herstellers aufmerksam lesen und befolgen.

Ob die Reflektionseigenschaften des Messobjekts ausreichen, kann festgestellt werden, indem die Laser auf der Oberfläche des Objekts scharf gestellt werden. Dies ist mit Hilfe der Steuer-Software möglich. Zeigt die Anzeige auf der Rückseite der Messköpfe oder das Kontrollerfenster der Software hohe Ausschläge, so wird ausreichend reflektiertes Licht von den Messköpfen wahrgenommen. Anderenfalls muss nachbehandelt werden.

**Sind die Dimensionen des Messobjekts bekannt**, so empfiehlt es sich, Reflektorfolienstücke mit eindeutigen Markierungen so exakt wie möglich auf wenigstens vier Stellen mit bekannten Koordinaten anzubringen. Dies ist für die Definition des inneren Koordinatensystems beim 3D-Abgleich von Vorteil sein und gewährleistet einen exakten Geometrieimport, so gewünscht.

**Sind die Dimensionen des Messobjekts nicht bekannt** oder ist die Oberfläche zu filigran, um die Reflektorfolienstücke exakt anzubringen, so sollten vier Folienstücke an Positionen mit gleicher Höhe angebracht werden.

Insgesamt sollten wenigstens zehn Stellen auf dem Messobjekt mit Folienstücken versehen werden. Diese Positionen sollten sich möglichst weit über das Messobjekt und über alle Höhen und Tiefen verteilen.

---

<sup>1</sup>Verwendet wurde bisher *Ardrox 9D1B* der Firma *Chemetall*

### 3 Messung

Nach dem Aufbau der Messvorrichtung und dem Einhängen des Messobjektes sind nun die Kontroller sowie der Rechner nacheinander einzuschalten und die Datenerfassungssoftware zu starten. Anschließend müssen die Verschlussklappen der Messköpfe geöffnet werden, damit sowohl ein Videobild zu sehen ist, als auch die Laser auf das Messobjekt treffen.

- Von dem Zeitpunkt, ab dem die Laser aktiv sind, muss zum Schutz des Augenlichtes unbedingt eine Laserschutzbrille getragen werden, sobald vor den Lasern gearbeitet wird. Auch schon ein kurzes Auftreffen der Laserstrahlen auf der Netzhaut kann bleibende Schäden verursachen und die Sehkraft beeinträchtigen. Von einem direkten Blick in den Laserstrahl ist trotz Laserschutzbrille abzusehen.

#### 3.1 Messung vorbereiten

Noch bevor die eigentliche Vorbereitung stattfindet ist darauf zu achten, dass die drei Messköpfe auch im 3D-Modus arbeiten. Hierfür ist im Menü unter *Setup* auf *Einstellungen* zu klicken und unter dem Reiter *Geräte* die Einstellung *PSV-400-3D* zu wählen. Nur dann werden aus den einzelnen Messrichtungen der Messköpfe automatisch Bewegungen entlang der Achsen des inneren Koordinatensystems des Messobjektes errechnet. Wie dieses Koordinatensystem eingerichtet wird, ist im Abschnitt *3D-Abgleich* beschrieben.

**Das Videofenster einzurichten** ist der erste Schritt. An das Messobjekt sollte so nah heran gezoomt werden, dass das gesamte Objekt bzw. alle Messpunkte gut zu sehen sind. Mit dem Fokus ist dann das Bild scharf zu stellen.

- Einmal eingestellt, sollten diese Einstellungen nicht mehr verändert werden. Andernfalls ist ein erneuter 2D- und 3D-Abgleich erforderlich.

**Der 2D-Abgleich** ist der zweite Schritt. Mit ihm wird die Bildebene auf die Oberfläche des Messobjektes übertragen. Die Laser der Messköpfe werden auf mindestens vier in einer Ebene liegenden Punkten gerichtet. Diese Punkte müssen nicht zwingend übereinander liegen, aber sie müssen auf dem Bildschirm eindeutig und genau lokalisiert und festgelegt werden.

**Der 3D-Abgleich** ist der dritte Schritt und erfordert die meiste Zeit. Da mit ihm das innere Koordinatensystem und die grobe Geometrie des Messobjektes festgelegt werden, sollte dieser Abgleich trotz des Aufwandes aber sehr akribisch durchgeführt werden. Sollte das Messobjekt schon einmal gemessen worden sein, gilt die nun einzurichtende Messung der Verifizierung bereits ermittelter Daten, so ist der Abgleich so exakt wie möglich auf die ursprünglichen Abgleichpunkte durchzuführen. Von diesen aus wird das System im weiteren Verlauf die einzelnen Scanpunkte berechnen oder wieder aufspannen.

- Gerade bei flachen Oberflächen ist es erforderlich, einen zusätzlichen Messpunkt vor dem Objekt zu positionieren. Dieser dient beim Abgleich einer möglichst großen Spiegelauslenkung und damit möglichst exakten Einordnung der übrigen Spiegelauslenkungen auf der Geometrie. Dieser Messpunkt kann nach dem Abgleich wieder entfernt werden.

**Messpunkte festlegen** ist der vierte Schritt. Nach erfolgreichem 2D- und 3D-Abgleich können mit zwei unterschiedlichen Verfahren Messpunkte auf dem Messobjekt verteilt werden. Handelt es sich um eine flächige Geometrie, welche mit einem Scan erfasst werden soll, so ist der Modus *Standard* zu wählen. Sollen nur einzelne, wenige Punkte erfasst werden, so können diese im Modus *Punkt* einzeln definiert und eingemessen werden. Im *Standard*-Modus können gerade komplexere Geometrien mit einem Polygonzug gut eingegrenzt werden. Anschließend kann festgelegt werden, ob das Netz der Messpunkte quadratisch, zentrisch, hexagonal oder frei aufgebaut und wie dicht es geknüpft werden soll. Die Software indiziert die Messpunkte selbstständig und speichert die gewonnenen Daten dementsprechend ab<sup>2</sup>.

**Den Geometriescan durchführen** ist der fünfte und vorletzte Punkt, bevor die Einstellungen gespeichert werden sollten und die Einrichtung des Messobjektes beendet ist. Dieser dient der Software, um alle Messpunkte genau zwischen den Abgleichpunkten zu lokalisieren. Auch ist der Geometriescan notwendige Vorbedingung für den letzten Schritt. Ersetzt werden kann dieser Schritt durch den Import von Geometriedaten<sup>3</sup>.

**Die Einstellung des Fokus** ist der sechste und letzte Schritt und benötigt einen zuvor durchgeführten Geometriescan. Jeder der drei Messköpfe stellt nach dem Auslösen der Fokussmessung eigenständig seine Fokuswerte für alle Punkte ein, für die neue Werte erforderlich sind. Dies ist wichtig, um möglichst hohe Rückstrahlung vom Messobjekt zum Messkopf zu erzielen. Nach diesem Schritt sollten die **Einstellungen gespeichert** werden.

Abhängig davon, ob eine Modalanalyse oder eine Dämpfungsmessung stattfinden soll, variieren die nächsten Schritte.

## Modalanalyse

Für die Modalanalyse empfiehlt sich die Messung im Frequenzbereich. Unter dem Reiter *Generell* sollte folglich die Option *FFT*<sup>4</sup> gewählt werden. In der Regel sollte eine Mittelung nicht notwendig sein. Im zweiten Reiter *Kanäle* ist in der Spalte *Aktiv* sowohl das Vibrometer als auch der Referenzkanal 1 *Ref1* zu markieren. Die Hauptmessrichtung des Messobjekts ist, abhängig von dem im 3D-Abgleich errichteten inneren Koordinatensystem, in der Spalte *Richtung* einzustellen. Wird das Messobjekt mit dem Lautsprecher einer externen Endstufe angeregt, so ist in der Spalte *Größe* die Option *Spannung* zu wählen. Für die Einstellung der übrigen Spalten ist das Softwarehandbuch zu konsultieren. Unter dem Reiter *Filter* sollten keine Filter eingerichtet sein, andernfalls sind sie zurückzusetzen. Unter dem Reiter *Frequenz* ist entsprechend den Anforderungen die Bandbreite und die Zahl der FFT-Linien, welche analysiert werden sollen, einzustellen. Da es ratsam ist mit einem *Burst Chirp* oder *Periodic Chirp* anzuregen<sup>5</sup>, kann hier auch das angeregte Spektrum in den Feldern *von* und *bis* präzisiert werden. Im Reiter *Fenster* sollte für alle relevanten Positionen *rechteckig* eingestellt sein. Unter dem Reiter *Trigger* ist die Option *intern* zu wählen. Um mögliche unbrauchbare Messungen zu wiederholen und zu ver-

<sup>2</sup>Änderungen der Indizierung sind möglich. Genauere Informationen sind dem Softwarehandbuch zu entnehmen.

<sup>3</sup>Für genauere Informationen ist das Softwarehandbuch zu konsultieren.

<sup>4</sup>Fast Fourier Transformation

<sup>5</sup>Siehe Reiter *Generator*

bessern, empfiehlt es sich, unter dem Reiter *SE* den Kanal *Vibrometer* zu markieren und den Regler wenigstens auf *Standard* zu stellen. Unter dem Reiter *Vibrometer* wird die erforderliche Messgenauigkeit eingestellt. Zu beachten ist, dass hiermit auch die Obergrenze der Abtastrate beeinflusst wird. Unter dem letzten Reiter *Generator* wird das Signal, welches das Messobjekt anregt, eingerichtet. Wie zuvor bereits erwähnt, empfiehlt es sich, mit einem *Chirp* anzuregen. Da das Generatorsignal auch gleichzeitig als Referenz genutzt wird, lässt sich hiermit das Generatorsignal aus der Messung eindeutiger herausrechnen.

### Dämpfungsermittlung

Die Dämpfungsermittlung findet im Gegensatz zur Modalanalyse im Zeitbereich<sup>6</sup> statt. Weitere Unterschiede in der Einstellung zu Modalanalyse befinden sich bei der Dämpfungsermittlung unter dem Reiter *Frequenz*, *Trigger* und *Generator*. Die einzigen möglichen Generatoreinstellung für eine Dämpfungsmessung sind wieder *Chirps*<sup>7</sup>. Um für jede der gemessenen Eigenfrequenzen vergleichbare Daten für das Dämpfungsverhalten ermitteln zu können, ist unter dem Reiter *Generator* sowohl die Start als auch die Endfrequenz auf den selben Wert zu setzen. Die Anregezeit wird in Prozent der Messdauer angegeben. *Warten auf stationären Zustand* ist auf Null zu setzen. Die Bandbreite unter dem Reiter *Frequenz* ist auf einen mehr als doppelt so großen Wert wie die höchste anzuregende Eigenfrequenz zu setzen. Die Zahl der Abtastpunkte ist derart zu wählen, dass die Messdauer pro Messpunkt etwas größer ist als die erwartete Abklingzeit inklusive der angegebenen Anregedauer des Messobjekts. Unter dem Reiter *Trigger* sollte der Pretrigger auf Null gesetzt werden.

## 3.2 Messung starten

Wird der Scan ausgelöst, so öffnet sich zuerst ein Dialogfenster, welches zur Festlegung des Speicherorts der Messung dient. Ab dem Beginn der Messung wird jeder gemessene Punkt gespeichert, ganz gleich, ob die Messung abgebrochen wird oder ungestört beendet werden kann. Auf Wunsch kann das *Analysator* Fenster geöffnet werden, um die Ergebnisse der Messung pro Punkt direkt verfolgen zu können. Je nach Einstellung unter den Reiter *SE* werden ungültige Messpunkte nur einmal oder öfter an leicht veränderten Koordinaten gemessen, um ein gültiges Ergebnis zu erzielen. Nach Beendigung der Messung ertönt ein Signalton und es öffnet sich ein Dialog, welcher die Möglichkeit bietet, die Analysesoftware zu öffnen.

---

<sup>6</sup>Option *Zeit* unter dem Reiter *Generell*

<sup>7</sup>Grund hierfür ist, dass einzig die Option *Chirps* für den internen Generator die Möglichkeit bietet, das Messobjekt länger abzutasten als es anzuregen.

## 4 Auswertung

Abhängig von der Anzahl und dem Reflektionsverhalten der Messpunkte, dauern beide Messungen jeweils unterschiedlich lange. Eine Modalanalyse ist bei gleicher Anzahl an Messpunkten eher abgeschlossen als eine Dämpfungsmessung.

**Nach Beendigung der Modalanalyse** müssen die Eigenfrequenzen bestimmt werden. Dafür werden in der Analysesoftware im Frequenzbereich mit dem Cursor die deutlichsten Resonanzfrequenzen markiert. Das Programm erkennt selbst die zu den Peaks gehörenden Frequenzen und erstellt, nachdem das Markieren beendet ist, daraus eine Liste. Für jede nun auswählbare Eigenfrequenz werden die Bewegungen des Messobjekts im Fenster der Analysesoftware als Animation dargestellt. Diese Animationen können, ebenso wie die Beschleunigungswerte der einzelnen Messpunkte, exportiert und gespeichert werden.

**Nach Beendigung der Dämpfungsermittlung** sollten die Bewegungskomponenten der einzelnen Richtungen x, y und z separat zur Weiterverarbeitung gespeichert werden. Dafür sind alle Punkte im Darstellungsfenster zu kopieren<sup>8</sup> und in eine Signalprozessorzelle<sup>9</sup> einzufügen. Mit den Funktionen des Signalprozessors lassen sich die einzelnen Komponenten extrahieren und müssen dann zurück in das ursprüngliche Analysefenster kopiert werden<sup>10</sup>. Von hier lassen sich nun alle Punktdaten als ASCII-File exportieren. Diese ASCII-Files können LabView<sup>11</sup> automatisiert eingelesen und analysiert werden. Ausgegeben werden für jede Richtung eine Textdatei in der für jeden Punkt die Koordinaten die maximale und minimale Amplitudenwerte sowie die Dämpfungskenngrößen und die bei der Ermittlung tolerierten Residuen festgehalten sind. Diese Datei kann nun zur weiteren Bearbeitung und Auswertung verwendet werden.

---

<sup>8</sup>Rechtsklick und dann *alle Punkte kopieren*

<sup>9</sup>Zu öffnen über die Menüleiste *Neu - Neuer Signalprozessor*

<sup>10</sup>Via *Drag and Drop*

<sup>11</sup>Skript *Auswertung\_Daempfung\_Stapelverarbeitung\_LabView2010.vi*

## B Messeinstellungen

### B.1 Einstellungen der Messung 1502031200

Name: C:\Dokumente und  
Einstellungen\Administrator\Eigene  
Dateien\ISM\ISM\_Lüdtke\15020390\1200\150203  
1200\_Scan\_time.svd  
Benutzer: Administrator  
Erzeugt: Datum: 03.02.2015 Zeit: 12:07:20  
Dateiversion: 9.00  
Programmversion: 9.0.0.0

Kommentar

Informationen zur Messung

Kompaktes Dateiformat

Kompaktes Dateiformat

Scanpunkte

Total:	84	
Nicht gemessen:	0	0.0 %
Gültig:	82	97.6 %
Overrange:	2	2.4 %
Ungültig:	0	0.0 %
Gesperrt:	0	0.0 %
Nicht erreichbar:	0	0.0 %
Verdeckt:	0	0.0 %
VT fehlgeschlagen:	0	0.0 %

Hardware

Scankopf Oben: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Links: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Rechts: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Anschlussbox: PSV-E-401-3D  
Firmware Version: 2.2

Datenerfassungskarte: National Instruments PCI-4462  
Anzahl der Kanäle: 8  
Höchste Abtastrate: 204.8 kHz

Funktionsgenerator  
Anzahl der Kanäle: 4

Allgemein

Datenerfassungsmodus: Zeit  
Mittelung: keine  
Automatisches Nachmessen: Aktiv  
AutoRange: Nicht aktiv  
PCA (MIMO): Nicht aktiv

Datenerfassung

Abtastpunkte: 131072  
Abtastfrequenz: 5.12 kHz  
Messzeit: 25.6 s  
Auflösung: 195.3125  $\mu$ s

Trigger

Quelle: Intern  
Flanke: Steigend  
Pretrigger: 0 %

Kanal Vibrometer 3D (verbunden mit Vibrometer 1)

Bereich: 3.162278 V  
Kopplung: DC  
Impedanz: 1 M $\Omega$ m

Differentieller Eingang: Aus  
 Größe: Geschwindigkeit  
 Kalibrierungsfaktor:  $50e-3$  (m/s)/V  
 Signalverzögerung:  $8.21e-6$  s  
 Filtertyp: Kein Filter  
 Int/Diff Größe: Geschwindigkeit  
 Signal Enhancement: Aktiv

## Kanal Referenz 1

Referenz: Aktiv  
 Referenzpunktindex: 0  
 Richtung: +X  
 Bereich: 10 V  
 Kopplung: DC  
 Impedanz: 1 M $\Omega$ m  
 IEPE: Aus  
 Differentieller Eingang: Aus  
 Größe: Spannung  
 Kalibrierungsfaktor: 1  
 Signalverzögerung: 0 s  
 Filtertyp: Kein Filter  
 Int/Diff Größe: Spannung  
 Signal Enhancement: Nicht aktiv

## Vibrometer 1

Controller: OFV-5000  
 Firmware-Version: 2.11  
 Tracking-Filter: Slow

## Geschwindigkeitsausgang

Bereich: VD-09 50 mm/s/V  
 Tiefpassfilter: Off  
 Hochpassfilter: Off

## Wegausgang

Bereich: DD-900 500  $\mu$ m/V

## Funktionsgenerator 1

Typ: NI 671x  
 Signal: Burst Chirp  
 Amplitude: 1 V  
 Offset: 0 V  
 Startfrequenz: 45.41 Hz  
 Endfrequenz: 45.41 Hz  
 Burst-Start: 1 %  
 Burst-Länge: 25 %  
 Mehrkanalig: Aus

**B.2 Einstellungen der Messung 1501201545**

Name: C:\Dokumente und  
Einstellungen\Administrator\Eigene  
Dateien\ISM\ISM\_Lüdtke\15012090\b3zunehmend  
\1545\1501201545\_Scan.svd  
Benutzer: Administrator  
Erzeugt: Datum: 20.01.2015 Zeit: 15:46:53  
Dateiversion: 9.00  
Programmversion: 9.0.0.0

Kommentar

Informationen zur Messung

Kompaktes Dateiformat

Kompaktes Dateiformat

Kompaktes Dateiformat

Kompaktes Dateiformat

Scanpunkte

Total:	66	
Nicht gemessen:	0	0.0 %
Gültig:	1	1.5 %
Optimal:	64	97.0 %
Overtime:	1	1.5 %
Ungültig:	0	0.0 %
Gesperrt:	0	0.0 %
Nicht erreichbar:	0	0.0 %
Verdeckt:	0	0.0 %
VT fehlgeschlagen:	0	0.0 %

Hardware

Scankopf Oben: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Links: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Rechts: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Anschlussbox: PSV-E-401-3D  
Firmware Version: 2.2

Datenerfassungskarte: National Instruments PCI-4462  
Anzahl der Kanäle: 8  
Höchste Abtastrate: 204.8 kHz

Funktionsgenerator  
Anzahl der Kanäle: 4

Allgemein

Datenerfassungsmodus: FFT  
Mittelung: keine  
Automatisches Nachmessen: Aktiv  
AutoRange: Nicht aktiv  
PCA (MIMO): Nicht aktiv

Frequenz

Bandbreite: 781.25 Hz  
Bandbreite von: 9.765625 Hz  
Bandbreite bis: 700.1953125 Hz

Datenerfassung

FFT Linien: 1600  
Abtastfrequenz: 2 kHz  
Messzeit: 2.048 s  
Auflösung: 488.28125 mHz



## Trigger

Quelle: Intern  
 Flanke: Steigend  
 Pretrigger: -10 %  
 Phase aus Referenz: Aus

## Kanal Vibrometer 3D (verbunden mit Vibrometer 1)

Bereich: 10 V  
 Kopplung: DC  
 Impedanz: 1 M $\Omega$   
 Differentieller Eingang: Aus  
 Größe: Geschwindigkeit  
 Kalibrierungsfaktor: 5e-3 (m/s)/V  
 Signalverzögerung: 20.75e-6 s  
 Filtertyp: Kein Filter  
 Int/Diff Größe: Geschwindigkeit  
 Fensterfunktion: Rechteck  
 Signal Enhancement: Aktiv

## Kanal Referenz 1

Referenz: Aktiv  
 Referenzpunktindex: 0  
 Richtung: +Z  
 Bereich: 10 V  
 Kopplung: DC  
 Impedanz: 1 M $\Omega$   
 IEPE: Aus  
 Differentieller Eingang: Aus  
 Größe: Schalldruck  
 Kalibrierungsfaktor: 10e-3 Pa/V  
 Signalverzögerung: 0 s  
 Filtertyp: Kein Filter  
 Int/Diff Größe: Schalldruck  
 Fensterfunktion: Rechteck  
 Signal Enhancement: Nicht aktiv

## Signal Enhancement

Speckle Tracking: Aktiv  
 Modus: Standard

## Vibrometer 1

Controller: OFV-5000  
 Firmware-Version: 2.11  
 Tracking-Filter: Slow

## Geschwindigkeitsausgang

Bereich: VD-09 5 mm/s/V  
 Tiefpassfilter: Off  
 Hochpassfilter: Off

## Wegausgang

Bereich: DD-900 50 nm/V

## Funktionsgenerator 1

Typ: NI 671x  
 Signal: Burst Chirp  
 Amplitude: 1 V  
 Offset: 0 V  
 Startfrequenz: 10 Hz  
 Endfrequenz: 700 Hz  
 Burst-Start: 1 %  
 Burst-Länge: 50 %  
 Mehrkanalig: Aus

**B.3 Einstellungen der Messung 1501211010**

Name: C:\Dokumente und  
Einstellungen\Administrator\Eigene  
Dateien\ISM\ISM\_Lüdtke\15012190\b2abnehmend  
\1501211010\_Scan.svd  
Benutzer: Administrator  
Erzeugt: Datum: 21.01.2015 Zeit: 10:09:49  
Dateiversion: 9.00  
Programmversion: 9.0.0.0

Kommentar

Informationen zur Messung

Kompaktes Dateiformat

Kompaktes Dateiformat

Kompaktes Dateiformat

Kompaktes Dateiformat

Scanpunkte

Total:	66	
Nicht gemessen:	0	0.0 %
Gültig:	1	1.5 %
Optimal:	65	98.5 %
Overtime:	0	0.0 %
Ungültig:	0	0.0 %
Gesperrt:	0	0.0 %
Nicht erreichbar:	0	0.0 %
Verdeckt:	0	0.0 %
VT fehlgeschlagen:	0	0.0 %

Hardware

Scankopf Oben: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Links: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Rechts: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Anschlussbox: PSV-E-401-3D  
Firmware Version: 2.2

Datenerfassungskarte: National Instruments PCI-4462  
Anzahl der Kanäle: 8  
Höchste Abtastrate: 204.8 kHz

Funktionsgenerator  
Anzahl der Kanäle: 4

Allgemein

Datenerfassungsmodus: FFT  
Mittelung: keine  
Automatisches Nachmessen: Aktiv  
AutoRange: Nicht aktiv  
PCA (MIMO): Nicht aktiv

Frequenz

Bandbreite: 781.25 Hz  
Bandbreite von: 9.765625 Hz  
Bandbreite bis: 700.1953125 Hz

Datenerfassung

FFT Linien: 1600  
Abtastfrequenz: 2 kHz  
Messzeit: 2.048 s  
Auflösung: 488.28125 mHz

## Trigger

Quelle:	Intern
Flanke:	Steigend
Pretrigger:	-10 %
Phase aus Referenz:	Aus

## Kanal Vibrometer 3D (verbunden mit Vibrometer 1)

Bereich:	10 V
Kopplung:	DC
Impedanz:	1 MOhm
Differentieller Eingang:	Aus
Größe:	Geschwindigkeit
Kalibrierungsfaktor:	5e-3 (m/s)/V
Signalverzögerung:	20.75e-6 s
Filtertyp:	Kein Filter
Int/Diff Größe:	Geschwindigkeit
Fensterfunktion:	Rechteck
Signal Enhancement:	Aktiv

## Kanal Referenz 1

Referenz:	Aktiv
Referenzpunktindex:	0
Richtung:	+Z
Bereich:	10 V
Kopplung:	DC
Impedanz:	1 MOhm
IEPE:	Aus
Differentieller Eingang:	Aus
Größe:	Schalldruck
Kalibrierungsfaktor:	10e-3 Pa/V
Signalverzögerung:	0 s
Filtertyp:	Kein Filter
Int/Diff Größe:	Schalldruck
Fensterfunktion:	Rechteck
Signal Enhancement:	Nicht aktiv

## Signal Enhancement

Speckle Tracking:	Aktiv
Modus:	Standard

## Vibrometer 1

Controller:	0FV-5000
Firmware-Version:	2.11
Tracking-Filter:	Slow

## Geschwindigkeitsausgang

Bereich:	VD-09 5 mm/s/V
Tiefpassfilter:	Off
Hochpassfilter:	Off

## Wegausgang

Bereich:	DD-900 50 nm/V
----------	----------------

## Funktionsgenerator 1

Typ:	NI 671x
Signal:	Burst Chirp
Amplitude:	1 V
Offset:	0 V
Startfrequenz:	10 Hz
Endfrequenz:	700 Hz
Burst-Start:	1 %
Burst-Länge:	50 %
Mehrkanalig:	Aus

**B.4 Einstellungen der Messung 1501201100**

Name: C:\Dokumente und  
Einstellungen\Administrator\Eigene  
Dateien\ISM\ISM\_Lüdtke\15012090\1501201100\_  
Scan.svd  
Benutzer: Administrator  
Erzeugt: Datum: 20.01.2015 Zeit: 10:59:35  
Dateiversion: 9.00  
Programmversion: 9.0.0.0

---

Kommentar

---

Informationen zur Messung

Kompaktes Dateiformat

Kompaktes Dateiformat

---

Scanpunkte

Total:	62	
Nicht gemessen:	0	0.0 %
Gültig:	0	0.0 %
Optimal:	62	100.0 %
Ovrange:	0	0.0 %
Ungültig:	0	0.0 %
Gesperrt:	0	0.0 %
Nicht erreichbar:	0	0.0 %
Verdeckt:	0	0.0 %
VT fehlgeschlagen:	0	0.0 %

---

Hardware

Scankopf Oben: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Links: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Rechts: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Anschlussbox: PSV-E-401-3D  
Firmware Version: 2.2

Datenerfassungskarte: National Instruments PCI-4462  
Anzahl der Kanäle: 8  
Höchste Abtastrate: 204.8 kHz

Funktionsgenerator  
Anzahl der Kanäle: 4

---

Allgemein

Datenerfassungsmodus: FFT  
Mittelung: keine  
Automatisches Nachmessen: Aktiv  
AutoRange: Nicht aktiv  
PCA (MIMO): Nicht aktiv

---

Frequenz

Bandbreite: 500 Hz  
Bandbreite von: 10 Hz  
Bandbreite bis: 500 Hz

---

Datenerfassung

FFT Linien: 3200  
Abtastfrequenz: 1.28 kHz  
Messzeit: 6.4 s  
Auflösung: 156.25 mHz

---

Trigger

Quelle: Intern  
Flanke: Steigend

Pretrigger: -10 %  
 Phase aus Referenz: Aus

---

Kanal Vibrometer 3D (verbunden mit Vibrometer 1)

Bereich: 10 V  
 Kopplung: DC  
 Impedanz: 1 MOhm  
 Differentieller Eingang: Aus  
 Größe: Geschwindigkeit  
 Kalibrierungsfaktor:  $5e-3$  (m/s)/V  
 Signalverzögerung:  $20.75e-6$  s  
 Filtertyp: Kein Filter  
 Int/Diff Größe: Geschwindigkeit  
 Fensterfunktion: Rechteck  
 Signal Enhancement: Aktiv

Kanal Referenz 1

Referenz: Aktiv  
 Referenzpunktindex: 0  
 Richtung: +Z  
 Bereich: 10 V  
 Kopplung: DC  
 Impedanz: 1 MOhm  
 IEPE: Aus  
 Differentieller Eingang: Aus  
 Größe: Schalldruck  
 Kalibrierungsfaktor:  $10e-3$  Pa/V  
 Signalverzögerung: 0 s  
 Filtertyp: Kein Filter  
 Int/Diff Größe: Schalldruck  
 Fensterfunktion: Rechteck  
 Signal Enhancement: Nicht aktiv

---

Signal Enhancement

Speckle Tracking: Aktiv  
 Modus: Standard

---

Vibrometer 1

Controller: OFV-5000  
 Firmware-Version: 2.11  
 Tracking-Filter: Slow

Geschwindigkeitsausgang

Bereich: VD-09 5 mm/s/V  
 Tiefpassfilter: Off  
 Hochpassfilter: Off

Wegausgang

Bereich: DD-900 50 nm/V

---

Funktionsgenerator 1

Typ: NI 671x  
 Signal: Burst Chirp  
 Amplitude: 1 V  
 Offset: 0 V  
 Startfrequenz: 20 Hz  
 Endfrequenz: 500 Hz  
 Burst-Start: 1 %  
 Burst-Länge: 50 %  
 Mehrkanalig: Aus

---

**B.5 Einstellungen der Messung 1501211205**

Name: C:\Dokumente und  
Einstellungen\Administrator\Eigene  
Dateien\ISM\ISM\_Lüdtke\15012190\b4abnehmend  
\1501211205\_Scan.svd  
Benutzer: Administrator  
Erzeugt: Datum: 21.01.2015 Zeit: 12:05:55  
Dateiversion: 9.00  
Programmversion: 9.0.0.0

Kommentar

Informationen zur Messung

Kompaktes Dateiformat

Kompaktes Dateiformat

Kompaktes Dateiformat

Scanpunkte

Total:	65	
Nicht gemessen:	0	0.0 %
Gültig:	0	0.0 %
Optimal:	64	98.5 %
Overrange:	1	1.5 %
Ungültig:	0	0.0 %
Gesperrt:	0	0.0 %
Nicht erreichbar:	0	0.0 %
Verdeckt:	0	0.0 %
VT fehlgeschlagen:	0	0.0 %

Hardware

Scankopf Oben: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Links: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Rechts: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Anschlussbox: PSV-E-401-3D  
Firmware Version: 2.2

Datenerfassungskarte: National Instruments PCI-4462  
Anzahl der Kanäle: 8  
Höchste Abtastrate: 204.8 kHz

Funktionsgenerator  
Anzahl der Kanäle: 4

Allgemein

Datenerfassungsmodus: FFT  
Mittelung: keine  
Automatisches Nachmessen: Aktiv  
AutoRange: Nicht aktiv  
PCA (MIMO): Nicht aktiv

Frequenz

Bandbreite: 781.25 Hz  
Bandbreite von: 9.765625 Hz  
Bandbreite bis: 700.1953125 Hz

Datenerfassung

FFT Linien: 1600  
Abtastfrequenz: 2 kHz  
Messzeit: 2.048 s  
Auflösung: 488.28125 mHz

Trigger

Quelle: Intern  
 Flanke: Steigend  
 Pretrigger: -10 %  
 Phase aus Referenz: Aus

---

Kanal Vibrometer 3D (verbunden mit Vibrometer 1)

Bereich: 10 V  
 Kopplung: DC  
 Impedanz: 1 MOhm  
 Differentieller Eingang: Aus  
 Größe: Geschwindigkeit  
 Kalibrierungsfaktor:  $5e-3$  (m/s)/V  
 Signalverzögerung:  $20.75e-6$  s  
 Filtertyp: Kein Filter  
 Int/Diff Größe: Geschwindigkeit  
 Fensterfunktion: Rechteck  
 Signal Enhancement: Aktiv

Kanal Referenz 1

Referenz: Aktiv  
 Referenzpunktindex: 0  
 Richtung: +Z  
 Bereich: 10 V  
 Kopplung: DC  
 Impedanz: 1 MOhm  
 IEPE: Aus  
 Differentieller Eingang: Aus  
 Größe: Schalldruck  
 Kalibrierungsfaktor:  $10e-3$  Pa/V  
 Signalverzögerung: 0 s  
 Filtertyp: Kein Filter  
 Int/Diff Größe: Schalldruck  
 Fensterfunktion: Rechteck  
 Signal Enhancement: Nicht aktiv

---

Signal Enhancement

Speckle Tracking: Aktiv  
 Modus: Standard

---

Vibrometer 1

Controller: OFV-5000  
 Firmware-Version: 2.11  
 Tracking-Filter: Slow

Geschwindigkeitsausgang

Bereich: VD-09 5 mm/s/V  
 Tiefpassfilter: Off  
 Hochpassfilter: Off

Wegausgang

Bereich: DD-900 50 nm/V

---

Funktionsgenerator 1

Typ: NI 671x  
 Signal: Burst Chirp  
 Amplitude: 1 V  
 Offset: 0 V  
 Startfrequenz: 10 Hz  
 Endfrequenz: 700 Hz  
 Burst-Start: 1 %  
 Burst-Länge: 50 %  
 Mehrkanalig: Aus

---

**B.6 Einstellungen der Messung 1501211353**

Name: C:\Dokumente und  
Einstellungen\Administrator\Eigene  
Dateien\ISM\ISM\_Lüdtke\15012190\b5abnehmend  
\1501211353\_Scan.svd  
Benutzer: Administrator  
Erzeugt: Datum: 21.01.2015 Zeit: 13:53:12  
Dateiversion: 9.00  
Programmversion: 9.0.0.0

Kommentar

Informationen zur Messung

Kompaktes Dateiformat

Kompaktes Dateiformat

Kompaktes Dateiformat

Scanpunkte

Total:	63	
Nicht gemessen:	0	0.0 %
Gültig:	0	0.0 %
Optimal:	63	100.0 %
Overrange:	0	0.0 %
Ungültig:	0	0.0 %
Gesperrt:	0	0.0 %
Nicht erreichbar:	0	0.0 %
Verdeckt:	0	0.0 %
VT fehlgeschlagen:	0	0.0 %

Hardware

Scankopf Oben: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Links: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Rechts: PSV-I-400 LR (0FV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Anschlussbox: PSV-E-401-3D  
Firmware Version: 2.2

Datenerfassungskarte: National Instruments PCI-4462  
Anzahl der Kanäle: 8  
Höchste Abtastrate: 204.8 kHz

Funktionsgenerator  
Anzahl der Kanäle: 4

Allgemein

Datenerfassungsmodus: FFT  
Mittelung: keine  
Automatisches Nachmessen: Aktiv  
AutoRange: Nicht aktiv  
PCA (MIMO): Nicht aktiv

Frequenz

Bandbreite: 781.25 Hz  
Bandbreite von: 9.765625 Hz  
Bandbreite bis: 700.1953125 Hz

Datenerfassung

FFT Linien: 1600  
Abtastfrequenz: 2 kHz  
Messzeit: 2.048 s  
Auflösung: 488.28125 mHz

Trigger



Quelle: Intern  
 Flanke: Steigend  
 Pretrigger: -10 %  
 Phase aus Referenz: Aus

## Kanal Vibrometer 3D (verbunden mit Vibrometer 1)

Bereich: 10 V  
 Kopplung: DC  
 Impedanz: 1 MOhm  
 Differentieller Eingang: Aus  
 Größe: Geschwindigkeit  
 Kalibrierungsfaktor:  $5e-3$  (m/s)/V  
 Signalverzögerung:  $20.75e-6$  s  
 Filtertyp: Kein Filter  
 Int/Diff Größe: Geschwindigkeit  
 Fensterfunktion: Rechteck  
 Signal Enhancement: Aktiv

## Kanal Referenz 1

Referenz: Aktiv  
 Referenzpunktindex: 0  
 Richtung: +Z  
 Bereich: 10 V  
 Kopplung: DC  
 Impedanz: 1 MOhm  
 IEPE: Aus  
 Differentieller Eingang: Aus  
 Größe: Schalldruck  
 Kalibrierungsfaktor:  $10e-3$  Pa/V  
 Signalverzögerung: 0 s  
 Filtertyp: Kein Filter  
 Int/Diff Größe: Schalldruck  
 Fensterfunktion: Rechteck  
 Signal Enhancement: Nicht aktiv

## Signal Enhancement

Speckle Tracking: Aktiv  
 Modus: Standard – Sehr gut

## Vibrometer 1

Controller: OFV-5000  
 Firmware-Version: 2.11  
 Tracking-Filter: Slow

## Geschwindigkeitsausgang

Bereich: VD-09 5 mm/s/V  
 Tiefpassfilter: Off  
 Hochpassfilter: Off

## Wegausgang

Bereich: DD-900 50 nm/V

## Funktionsgenerator 1

Typ: NI 671x  
 Signal: Burst Chirp  
 Amplitude: 1 V  
 Offset: 0 V  
 Startfrequenz: 10 Hz  
 Endfrequenz: 700 Hz  
 Burst-Start: 1 %  
 Burst-Länge: 50 %  
 Mehrkanalig: Aus

**B.7 Einstellungen der Messung 1503300940**

Name: C:\Dokumente und  
Einstellungen\Administrator\Eigene  
Dateien\ISM\ISM\_Lüdtke\150330\1503300940b1\  
1503300940b1\_Scan\_time.svd  
Benutzer: Administrator  
Erzeugt: Datum: 30.03.2015 Zeit: 09:41:21  
Dateiversion: 9.00  
Programmversion: 9.0.0.0

-----  
Kommentar

-----  
Informationen zur Messung

Kompaktes Dateiformat

-----  
Scanpunkte

Total:	73	
Nicht gemessen:	0	0.0 %
Gültig:	73	100.0 %
Ovrange:	0	0.0 %
Ungültig:	0	0.0 %
Gesperrt:	0	0.0 %
Nicht erreichbar:	0	0.0 %
Verdeckt:	0	0.0 %
VT fehlgeschlagen:	0	0.0 %

-----  
Hardware

Scankopf Oben: PSV-I-400 LR (OFV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Links: PSV-I-400 LR (OFV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Rechts: PSV-I-400 LR (OFV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Anschlussbox: PSV-E-401-3D  
Firmware Version: 2.2

Datenerfassungskarte: National Instruments PCI-4462  
Anzahl der Kanäle: 8  
Höchste Abtastrate: 204.8 kHz

Funktionsgenerator  
Anzahl der Kanäle: 4

-----  
Allgemein

Datenerfassungsmodus: Zeit  
Mittelung: keine  
Automatisches Nachmessen: Aktiv  
AutoRange: Nicht aktiv  
PCA (MIMO): Nicht aktiv

-----  
Datenerfassung

Abtastpunkte:	262144
Abtastfrequenz:	6.4 kHz
Messzeit:	40.96 s
Auflösung:	156.25 µs

-----  
Trigger

Quelle: Intern  
Flanke: Steigend  
Pretrigger: 0 %

-----  
Kanal Vibrometer 3D (verbunden mit Vibrometer 1)

Bereich: 10 V  
 Kopplung: DC  
 Impedanz: 1 M $\Omega$ m  
 Differentieller Eingang: Aus  
 Größe: Geschwindigkeit  
 Kalibrierungsfaktor: 50e-3 (m/s)/V  
 Signalverzögerung: 24.35e-6 s  
 Filtertyp: Kein Filter  
 Int/Diff Größe: Geschwindigkeit  
 Signal Enhancement: Aktiv

## Kanal Referenz 1

Referenz: Aktiv  
 Referenzpunktindex: 0  
 Richtung: -Z  
 Bereich: 31.62278 V  
 Kopplung: DC  
 Impedanz: 1 M $\Omega$ m  
 IEPE: Aus  
 Differentieller Eingang: Aus  
 Größe: Spannung  
 Kalibrierungsfaktor: 1  
 Signalverzögerung: 0 s  
 Filtertyp: Kein Filter  
 Int/Diff Größe: Spannung  
 Signal Enhancement: Nicht aktiv

-----  
Vibrometer 1

Controller: OFV-5000  
 Firmware-Version: 2.11  
 Tracking-Filter: Off

## Geschwindigkeitsausgang

Bereich: VD-08 50 mm/s/V  
 Tiefpassfilter: Off  
 Hochpassfilter: Off

## Wegausgang

Bereich: DD-900 50 nm/V

-----  
Funktionsgenerator 1

Typ: NI 671x  
 Signal: Burst Chirp  
 Amplitude: 1 V  
 Offset: 0 V  
 Startfrequenz: 53.4375 Hz  
 Endfrequenz: 53.4375 Hz  
 Burst-Start: 0 %  
 Burst-Länge: 35 %  
 Mehrkanalig: Aus

**B.8 Einstellungen der Messung 1503301315**

Name: C:\Dokumente und  
Einstellungen\Administrator\Eigene  
Dateien\ISM\ISM\_Lüdtke\150330\1503301315b1\  
1503301315b1\_Scan\_time.svd  
Benutzer: Administrator  
Erzeugt: Datum: 30.03.2015 Zeit: 14:16:51  
Dateiversion: 9.00  
Programmversion: 9.0.0.0

-----  
Kommentar  
-----

## Scanpunkte

Total:	73	
Nicht gemessen:	0	0.0 %
Gültig:	72	98.6 %
Overrange:	0	0.0 %
Ungültig:	0	0.0 %
Gesperrt:	1	1.4 %
Nicht erreichbar:	0	0.0 %
Verdeckt:	0	0.0 %
VT fehlgeschlagen:	0	0.0 %

## Hardware

Scankopf Oben: PSV-I-400 LR (OFV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Links: PSV-I-400 LR (OFV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Scankopf Rechts: PSV-I-400 LR (OFV-505)  
Firmware-Version: 1.20

Anschlussbox: PSV-E-401-3D  
Firmware Version: 2.2

Datenerfassungskarte: National Instruments PCI-4462  
Anzahl der Kanäle: 8  
Höchste Abtastrate: 204.8 kHz

Funktionsgenerator  
Anzahl der Kanäle: 4

## Allgemein

Datenerfassungsmodus: Zeit  
Mittelung: keine  
Automatisches Nachmessen: Aktiv  
AutoRange: Nicht aktiv  
PCA (MIMO): Nicht aktiv

## Datenerfassung

Abtastpunkte: 262144  
Abtastfrequenz: 6.4 kHz  
Messzeit: 40.96 s  
Auflösung: 156.25  $\mu$ s

## Trigger

Quelle: Intern  
Flanke: Steigend  
Pretrigger: 0 %

## Kanal Vibrometer 3D (verbunden mit Vibrometer 1)

Bereich: 10 V  
Kopplung: DC

Impedanz: 1 M0hm  
 Differentieller Eingang: Aus  
 Größe: Geschwindigkeit  
 Kalibrierungsfaktor: 50e-3 (m/s)/V  
 Signalverzögerung: 24.35e-6 s  
 Filtertyp: Kein Filter  
 Int/Diff Größe: Geschwindigkeit  
 Signal Enhancement: Aktiv

## Kanal Referenz 1

Referenz: Aktiv  
 Referenzpunktindex: 0  
 Richtung: -Z  
 Bereich: 31.62278 V  
 Kopplung: DC  
 Impedanz: 1 M0hm  
 IEPE: Aus  
 Differentieller Eingang: Aus  
 Größe: Spannung  
 Kalibrierungsfaktor: 1  
 Signalverzögerung: 0 s  
 Filtertyp: Kein Filter  
 Int/Diff Größe: Spannung  
 Signal Enhancement: Nicht aktiv

## Vibrometer 1

Controller: 0FV-5000  
 Firmware-Version: 2.11  
 Tracking-Filter: Off

## Geschwindigkeitsausgang

Bereich: VD-08 50 mm/s/V  
 Tiefpassfilter: Off  
 Hochpassfilter: Off

## Wegausgang

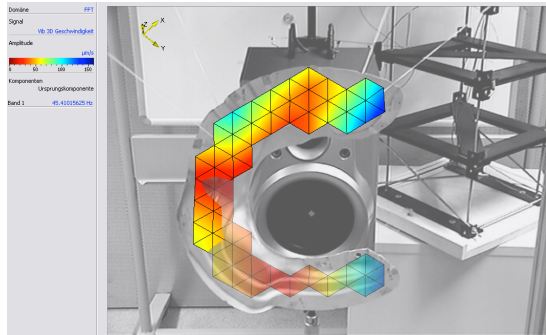
Bereich: DD-900 50 nm/V

## Funktionsgenerator 1

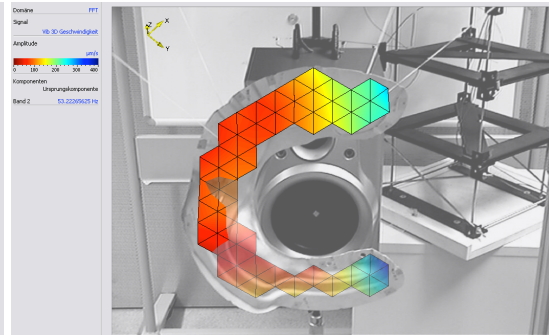
Typ: NI 671x  
 Signal: Burst Chirp  
 Amplitude: 1 V  
 Offset: 0 V  
 Startfrequenz: 110.9375 Hz  
 Endfrequenz: 110.9375 Hz  
 Burst-Start: 0 %  
 Burst-Länge: 35 %  
 Mehrkanalig: Aus

## C Eigenmoden

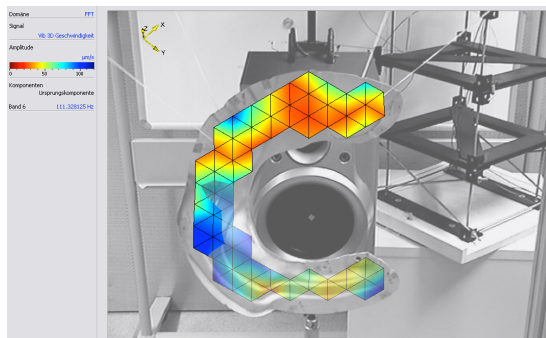
### C.1 Gemessene Eigenmoden



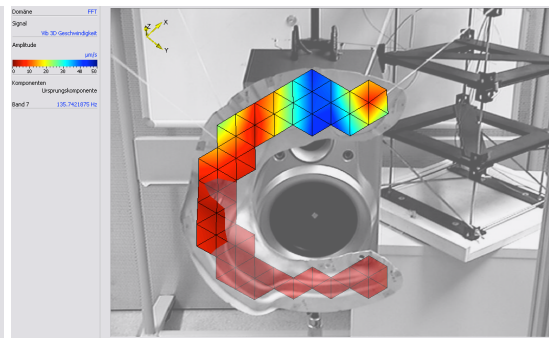
Mode 7 bei 45,4 Hz



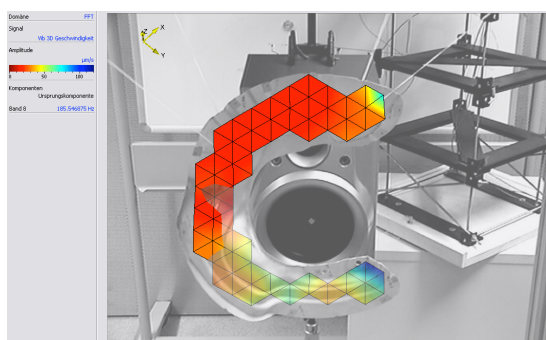
Mode 8 bei 53,2 Hz



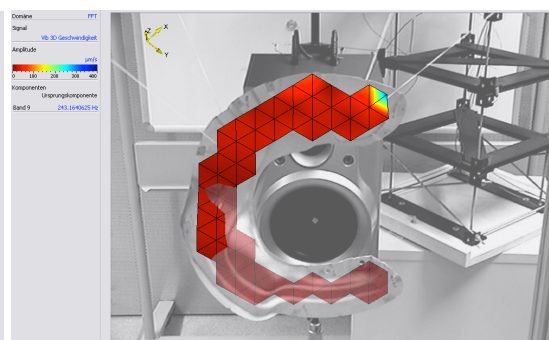
Mode 9 bei 111,3 Hz



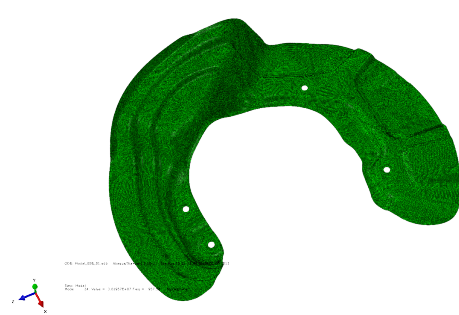
Mode 10 bei 135,7 Hz



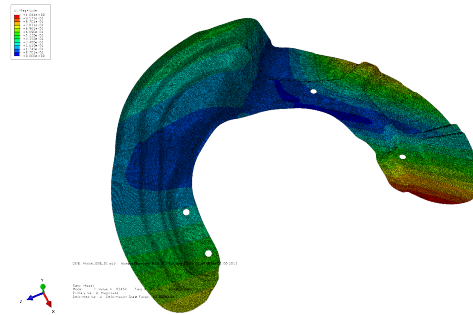
Mode 11 bei 185,5 Hz



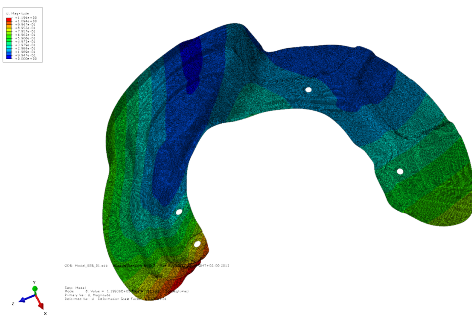
Mode 12 bei 243,2 Hz

**C.2 Simulierte Eigenmoden**

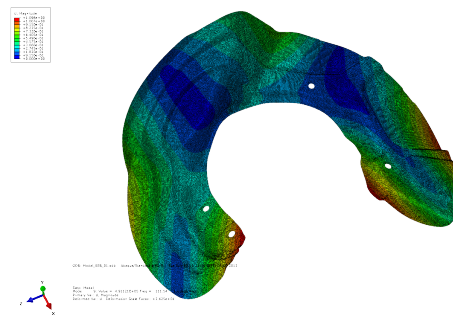
Unverformtes Bremsenschutzblech



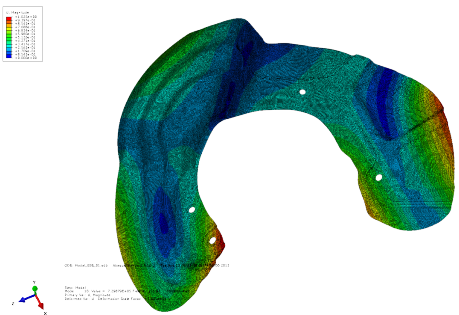
Mode 7 bei 45,7 Hz



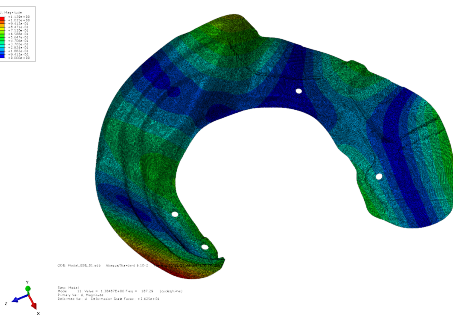
Mode 8 bei 55,1 Hz



Mode 9 bei 111,5 Hz

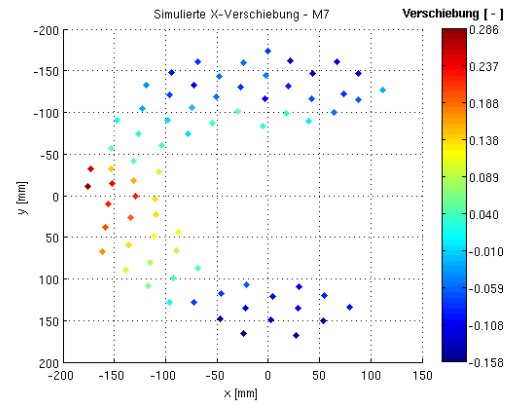
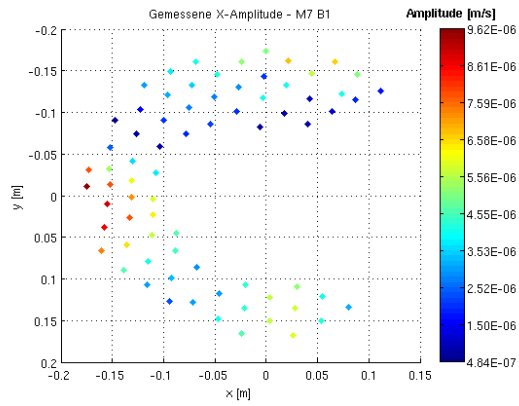


Mode 10 bei 136,0 Hz



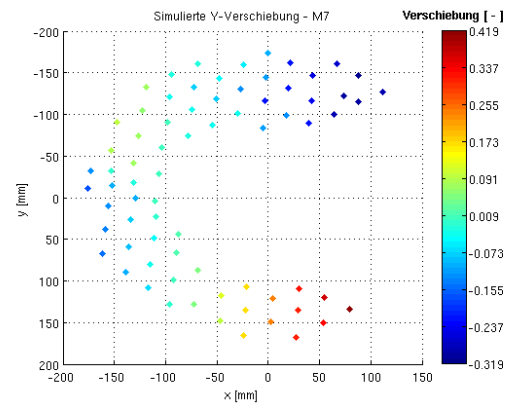
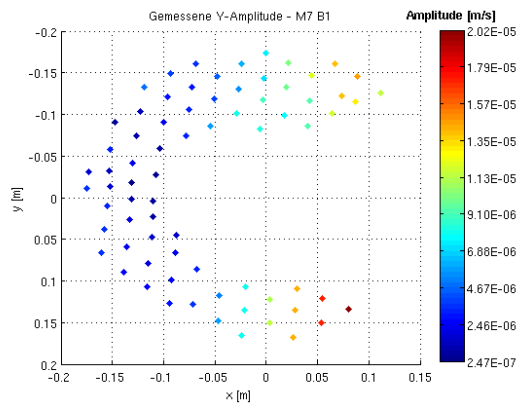
Mode 11 bei 187,3 Hz

## C.3 Komponenten von Mode 7



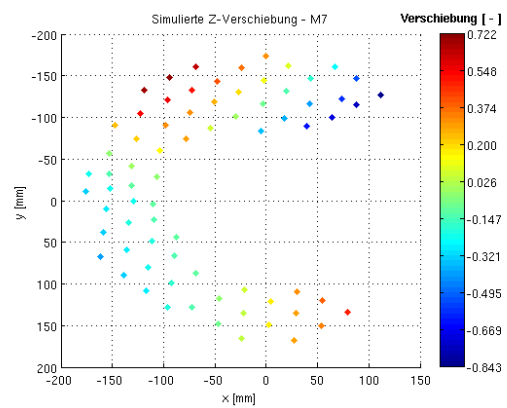
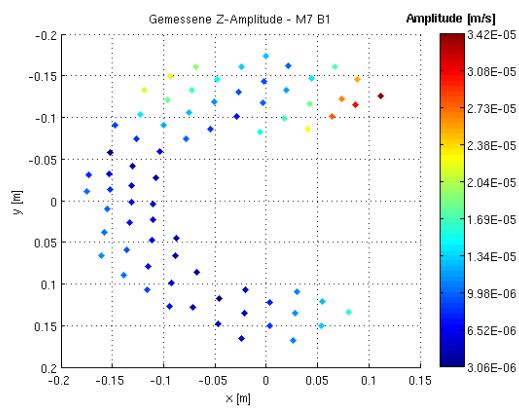
X Komponenten Gemessen Mode 7

X Komponenten Simuliert Mode 7



Y Komponenten Gemessen Mode 7

Y Komponenten Simuliert Mode 7

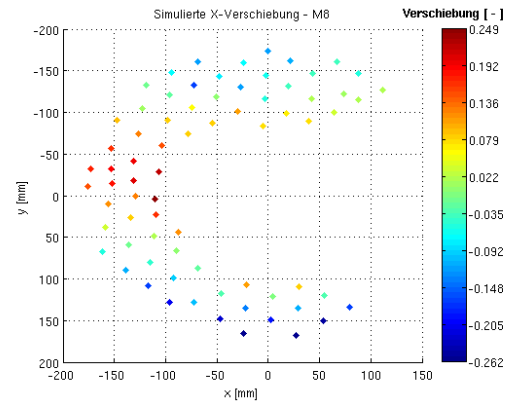
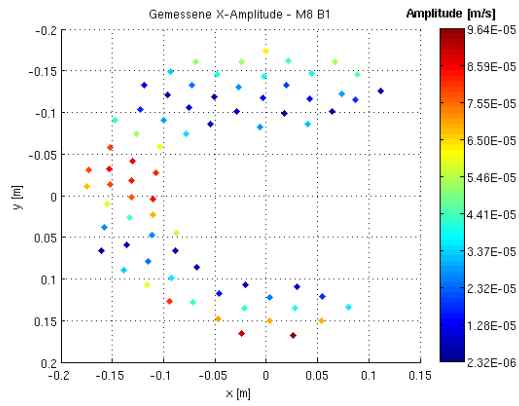


Z Komponenten Gemessen Mode 7

Z Komponenten Simuliert Mode 7

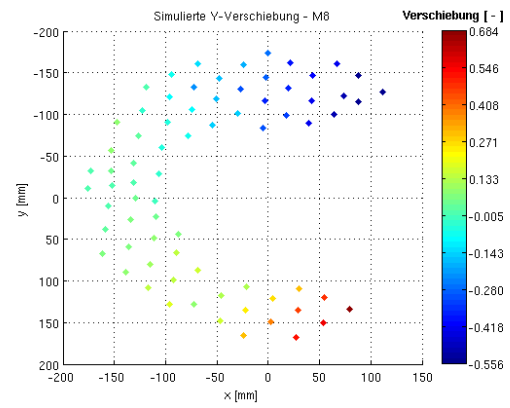
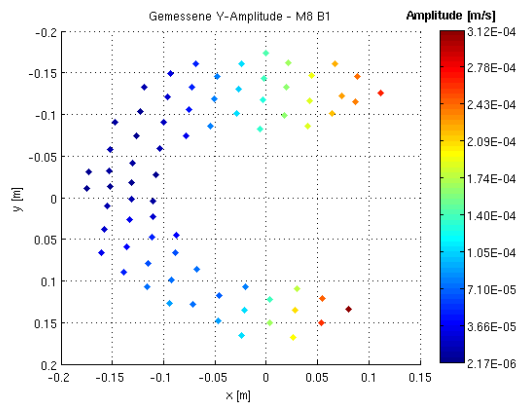


## C.4 Komponenten von Mode 8



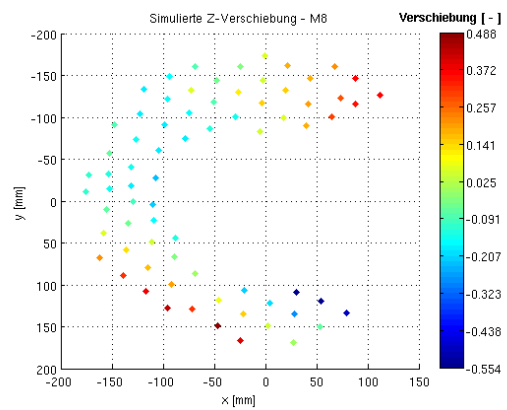
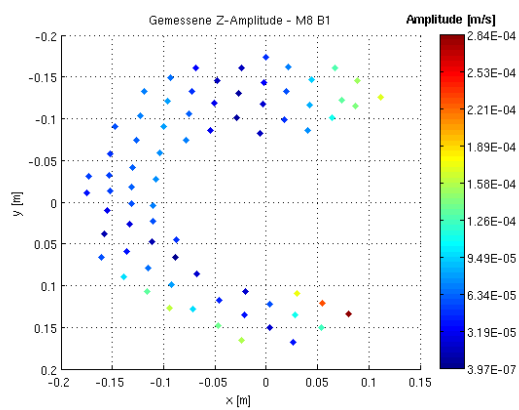
X Komponenten Gemessen Mode 8

X Komponenten Simuliert Mode 8



Y Komponenten Gemessen Mode 8

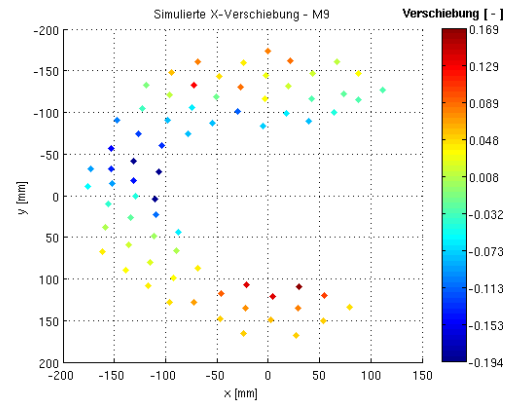
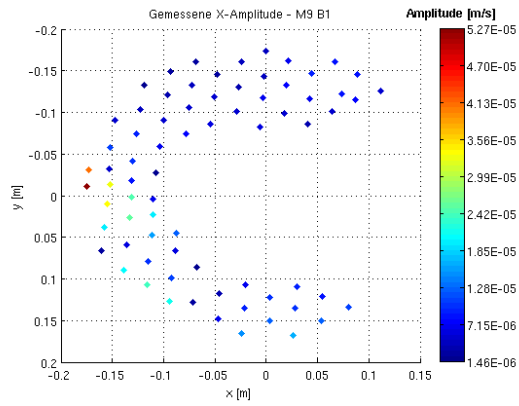
Y Komponenten Simuliert Mode 8



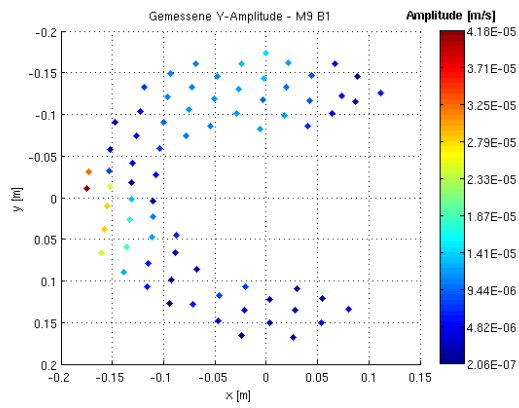
Z Komponenten Gemessen Mode 8

Z Komponenten Simuliert Mode 8

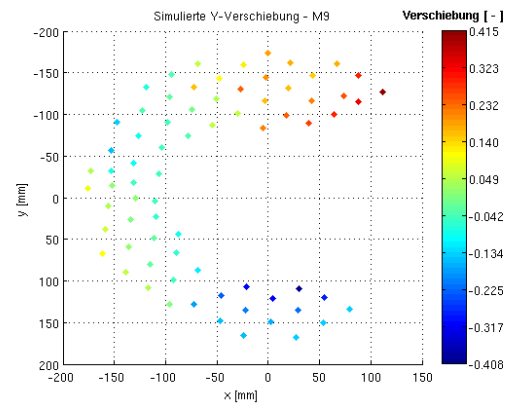
## C.5 Komponenten von Mode 9



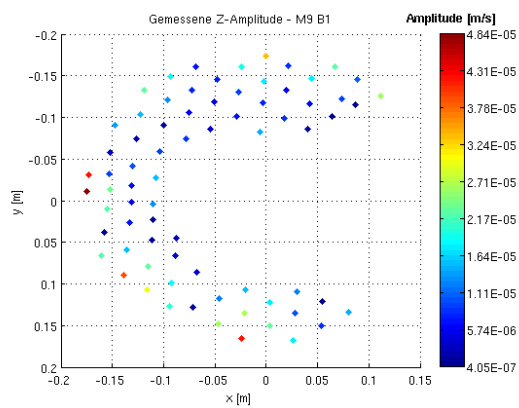
X Komponenten Gemessen Mode 9



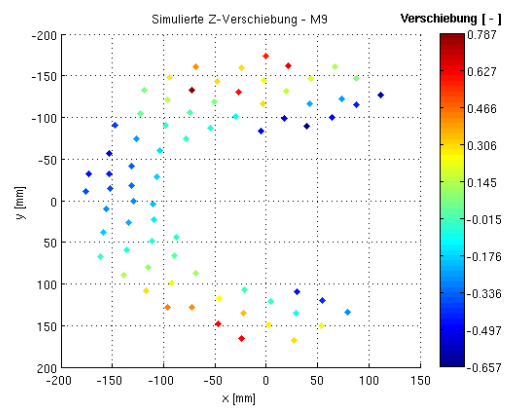
X Komponenten Simuliert Mode 9



Y Komponenten Gemessen Mode 9



Y Komponenten Simuliert Mode 9

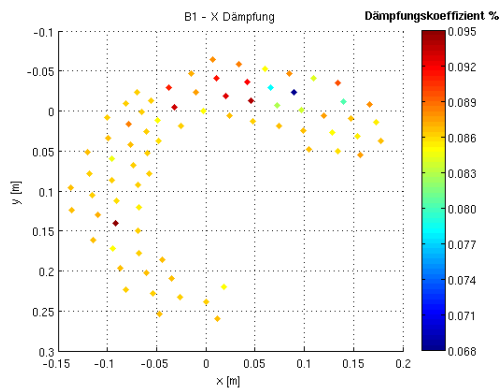


Z Komponenten Gemessen Mode 9

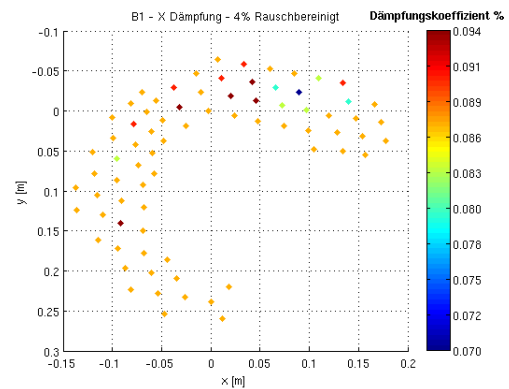
Z Komponenten Simuliert Mode 9

## D Dämpfung des BSB 1 (CB)

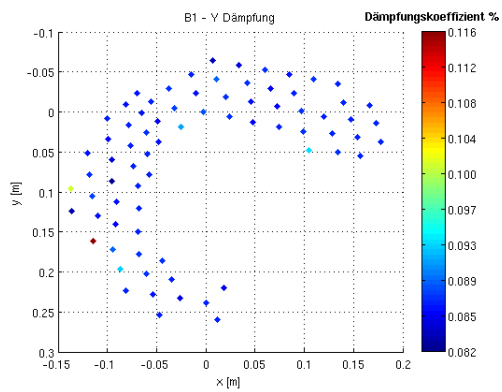
### D.1 Dämpfung Mode 7 - 45,4 Hz



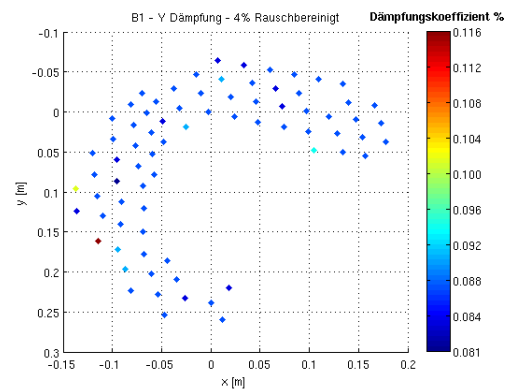
X Komponenten Dämpfung Mode 7



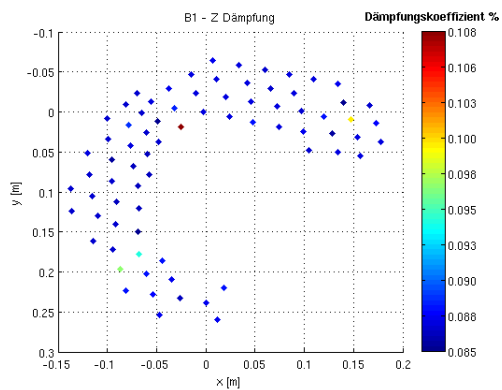
4 % Rauschbereinigte X Komponenten Dämpfung Mode 7



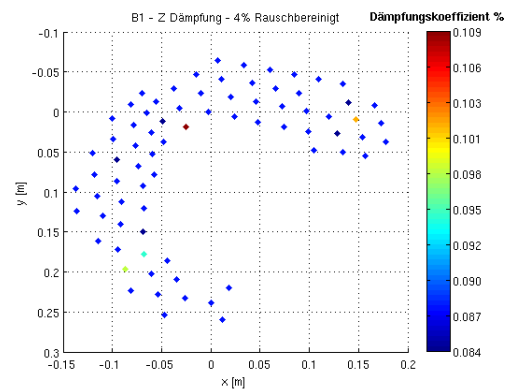
Y Komponenten Dämpfung Mode 7



4 % Rauschbereinigte Y Komponenten Dämpfung Mode 7

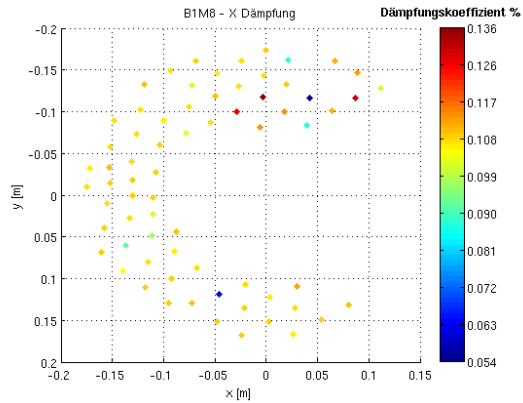


Z Komponenten Dämpfung Mode 7

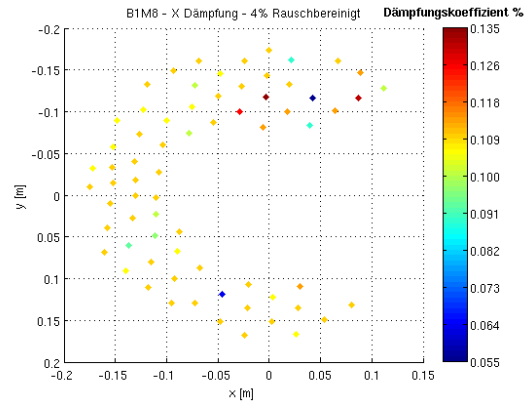


4 % Rauschbereinigte Z Komponenten Dämpfung Mode 7

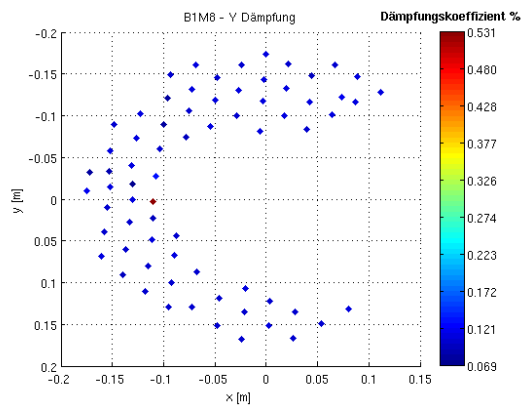
## D.2 Dämpfung Mode 8 - 53,2 Hz



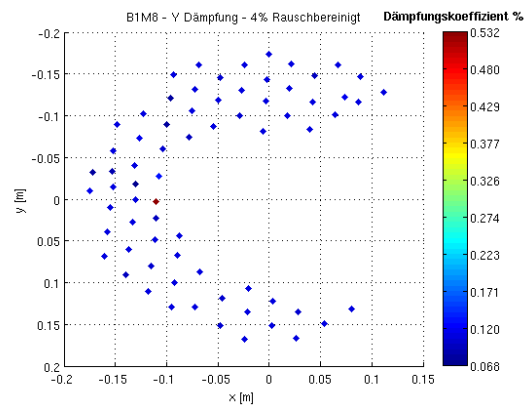
X Komponenten Dämpfung Mode 8



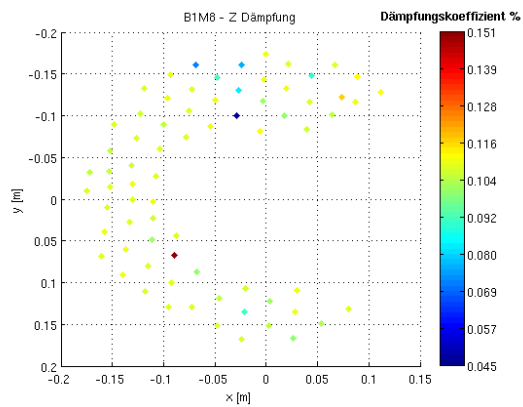
4 % Rauschbereinigte X Komponenten Dämpfung Mode 8



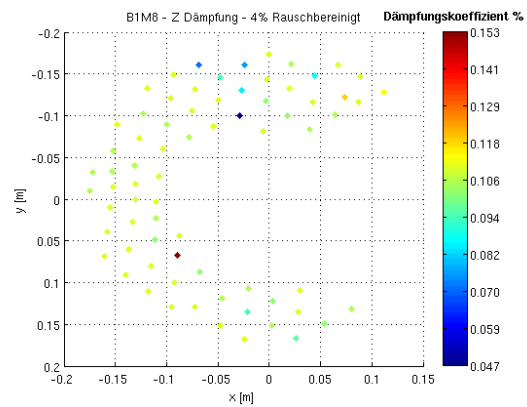
Y Komponenten Dämpfung Mode 8



4 % Rauschbereinigte Y Komponenten Dämpfung Mode 8

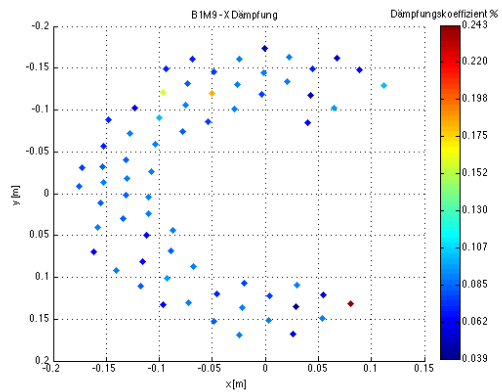


Z Komponenten Dämpfung Mode 8

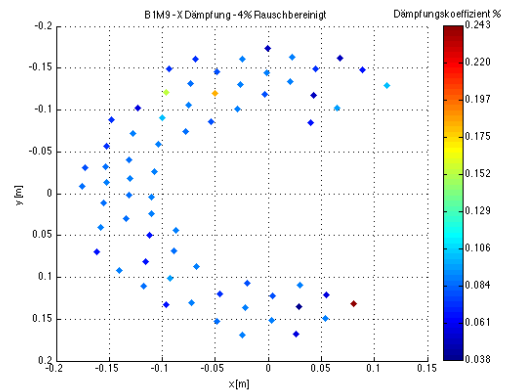


4 % Rauschbereinigte Z Komponenten Dämpfung Mode 8

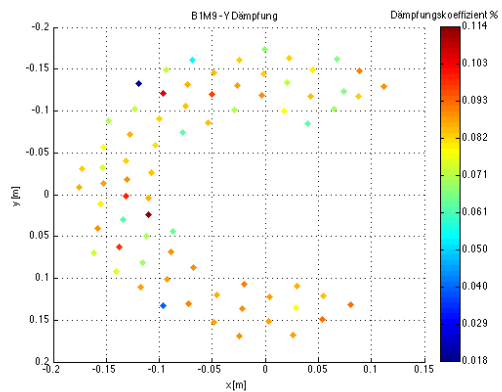
## D.3 Dämpfung Mode 9 - 111,3 Hz



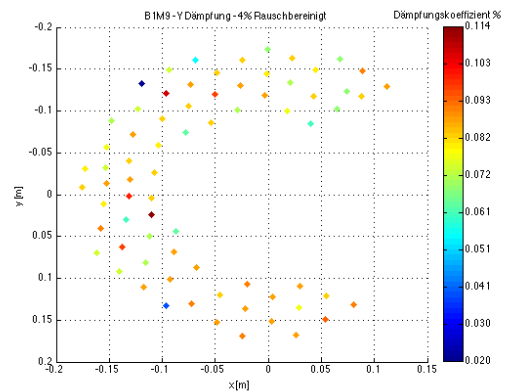
X Komponenten Dämpfung Mode 9



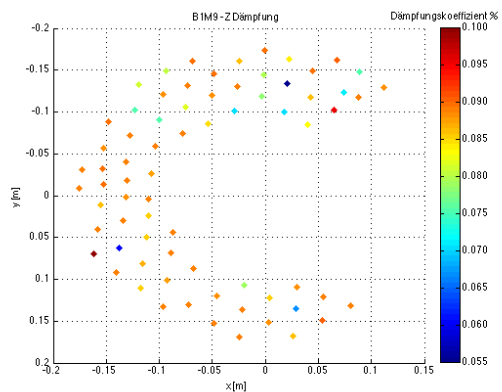
4 % Rauschbereinigte X Komponenten Dämpfung Mode 9



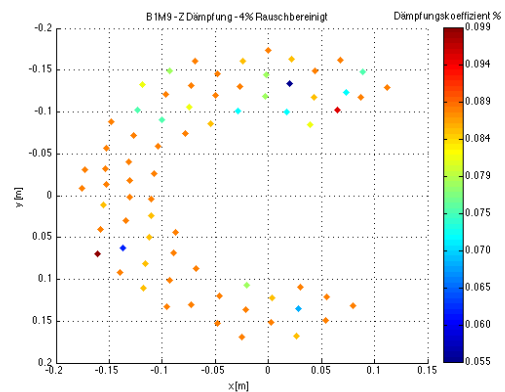
Y Komponenten Dämpfung Mode 9



4 % Rauschbereinigte Y Komponenten Dämpfung Mode 9



Z Komponenten Dämpfung Mode 9



4 % Rauschbereinigte Z Komponenten Dämpfung Mode 9